INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Enero 2015 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MEDICINA

Virus que combaten el cáncer

ESPACIO

Resultados de la misión Rosetta

LINGÜÍSTICA

Evolución de las lenguas andinas

Neurociencia de la MEDITACIÓN

Efectos cerebrales y psicológicos de las prácticas contemplativas

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

NEUROCIENCIA DE LA MEDITACIÓN | EXPLORACIÓN DEL CINTURÓN DE KUIPER | VIRUS ONCOLÍTICOS

ENERO 2015 N.º 460



6,90 EUROS

ciclo de
conferencias y debates en

ciencias

7.ª edición

FUNDACIÓN RAMÓN ARECES

Por séptimo año consecutivo, la Fundación Ramón Areces y Nature Publishing Group Iberoamérica, unidos con el objetivo de impulsar la divulgación científica, organizan conjuntamente un ciclo de conferencias y debates en ciencias, abordando cuestiones de actualidad y trasladando a la sociedad innovadores temas científicos y los avances más importantes en estas áreas, tratadas por grandes expertos internacionales.

Con esta iniciativa, la Fundación Ramón Areces y Nature Publishing Group Iberoamérica no pretenden crear únicamente unas jornadas de debate científico o médico, sino generar una reflexión colectiva sobre materias en las que entran en juego valores éticos que afectan a toda la sociedad. De esta manera, se pretende presentar estos avances científicos, interpretándolos y traduciéndolos desde la perspectiva de los beneficios y las ventajas que pueden suponer para el bienestar y la calidad de vida de la sociedad, pero también de sus posibles riesgos e inconvenientes, destacando e incidiendo en la importancia de la investigación en su progreso.

Medicina regenerativa

PROMESA DE FUTURO



La curación de enfermedades sin tratamiento, la regeneración de tejidos dañados por la vejez o por un traumatismo, la creación de órganos listos para trasplante o la solución a trastornos genéticos son algunos de los objetivos de la medicina regenerativa, una de las armas médicas del futuro y un campo de estudio real en el presente, a partir de la aplicación de las células madre.

En la actualidad, los científicos han probado la plasticidad de las células madre embrionarias, que son capaces de convertirse en otros linajes como neuronas, cardiomiocitos, osteocitos, etc. De hecho, estas mismas células han sido capaces de generar miniórganos como el hígado, cerebro y riñón. Toda una promesa para poder, en un futuro, conseguir órganos para trasplantes o injertos para reparar partes dañadas de un tejido, o también para probar fármacos específicos para enfermedades propias de esos órganos.

FUNDACIÓN RAMÓN ARECES
NATURE PUBLISHING GROUP

Medicina regenerativa
REGENERATIVE MEDICINE

Promesa de futuro
PROMISE OF FUTURE

MADRID
5 de febrero de 2015
17.30 h

INFORMACIÓN E INSCRIPCIONES
www.fundacionareces.es
C/ Vitruvio, 5 • 28006 Madrid
Metro: República Argentina / Gregorio Marañón
91 515 89 80
Fecha de inscripción: hasta el 4 de febrero de 2015

Intervenciones

Moderador
Juan Carlos López
Editor de *Nature Medicine*, Nueva York, EE.UU.

Aplicaciones biomédicas de las células madre pluripotentes inducidas
Ángel Raya
Director del Centro de Medicina Regenerativa de Barcelona CMR[B], España

Regeneración pluripotente independiente de órganos estables mediante inducción vascular
Shahin Rafii
Catedrático de Medicina Génica en el Weill Cornell Medical College de Nueva York, EE.UU.

Uso de la reprogramación directa para la reparación neuronal
Sergio Gascón
Investigador del Instituto de Investigación de Células Madre, Múnich, Alemania

Células madre esqueléticas y sus dobles "mesenquimales"
Paolo Bianco
Catedrático de Patología en la Universidad La Sapienza, Roma, Italia

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA
Enero 2015, Número 460

56




9


45


88

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

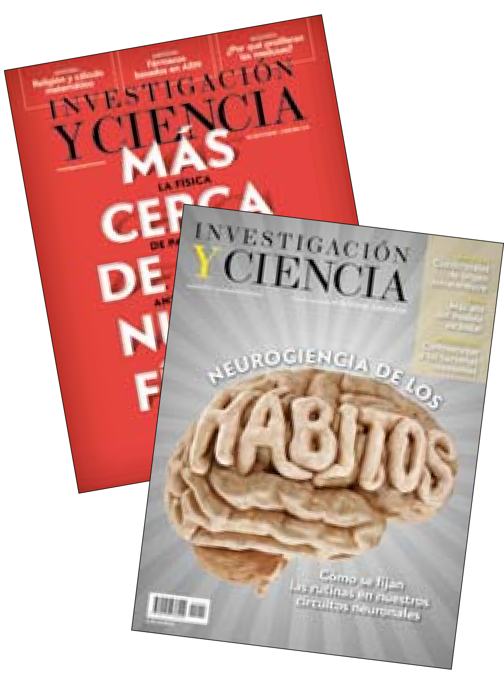
SECCIONES

EN PORTADA



Los estudios sobre la neurobiología de la meditación demuestran que esta práctica funciona como un medicamento milagroso. Atenúa la depresión y el dolor y promueve una sensación de bienestar. Y lo logra solo con dedicarle un par de minutos de descanso a nuestra existencia ajetreada, sin producir apenas efectos secundarios, si es que produce alguno. ¿Por qué no la recomiendan más a menudo los médicos? Imagen de Bryan Christie.

redaccion@investigacionyciencia.es



Junio y agosto 2014

LA BÚSQUEDA DE SUPERSIMETRÍA

En «La supersimetría y la crisis de la física» [Investigación y Ciencia, junio de 2014], Joseph Lykken y Maria Spiropulu analizan las expectativas creadas ante la posibilidad de que el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN encuentre indicios de supersimetría, así como las consecuencias para la física de que tal hallazgo no se produjese.

Sin embargo, hay una manera de enfocar la cuestión que los autores omiten. Numerosos investigadores ven buenos motivos para considerar modelos basados en la teoría de cuerdas y su variante, la teoría M, con dimensiones extra pequeñas. Para hacer predicciones a partir de las 10 u 11 dimensiones que postulan estas teorías, es necesario proyectarlas sobre un mundo con 4 dimensiones espaciotemporales. Varias de las descripciones resultantes han demostrado su éxito desde un punto de vista fenomenológico. En esencia, todos esos modelos predicen que algunos de los supercompañeros de los bosones electrodébiles deberían ser lo suficientemente ligeros para poder detectarlos en el LHC, y varios de ellos vaticinan que lo mismo debería ocurrir con los gluinos, los hipotéticos compañeros supersimétricos de los gluones.

Las predicciones basadas en estas teorías deberían ser tomadas en serio. Por mi parte, estaría encantado de apostar que las partículas supersimétricas aparecerán en el LHC, pero tengo problemas para encontrar a gente dispuesta a apostar lo contrario.

Gordon Kane
Universidad de Michigan

En su artículo, Lykken y Spiropulu hablan de la supuesta crisis que asaltaría la física en caso de que el LHC no hallase indicios de partículas supersimétricas. Sin embargo, los autores pasan por alto algunas de las posibilidades que, ya en 2012, desarrollé en la blogosfera de *Scientific American* (blogs.scientificamerican.com/guest-blog/2012/06/20/beyond-higgs-on-supersymmetry-or-lack-thereof/): que en el modelo estándar no falle absolutamente nada, que no sea necesario modificar ninguno de sus aspectos y que ni si quiera los efectos cuánticos de la gravedad lo arruinen. Tal escenario sería más aburrido que cualquiera de sus maravillosas alternativas, pero también mucho más simple.

Glenn D. Starkman
Universidad Case Western Reserve
Cleveland, Ohio

ARITMÉTICA DEL ADN

En «Detector de patógenos» [Investigación y Ciencia, agosto de 2014], David J. Ecker expone una técnica para identificar el origen de enfermedades causadas por virus, bacterias u hongos. En un ejemplo, el autor afirma que 43 unidades de adenina, 28 de guanina, 19 de citosina y 35 de timina constituyen la única solución posible para una hebra de ADN que pese 38.768,05 dáltons. He intentado reproducir el resultado y he obtenido unas diez soluciones. ¿Podría el autor explicar la técnica con mayor detalle?

David Mawdsley
Danbury, Connecticut

¿Sería posible emplear la técnica descrita por Ecker para identificar diferencias entre la microbiota del tracto digestivo de personas con un peso saludable y la de aquellas con obesidad mórbida? De ser el caso, tal vez pudieran desarrollarse probióticos específicos para cada individuo, con miras a mejorar su microbiota y facilitar la pérdida de peso.

Ron Rega
Marietta, Georgia

Responde ecker: *Mawdsley está en lo cierto. Referirse a una hebra de 38.768,05 dáltons como la única correspondiente a los nucleótidos indicados no era más que una simplificación con fines didácticos. En principio, incluir más cifras decimales garantizaría la unicidad de la solución, si bien esto pasa por alto que las mediciones adolecen de un error de 10 partes por millón (ppm). Al tener esta precisión en cuenta, ¡las combinaciones posibles ascienden a casi un millar!*

Sin embargo, nuestro método separa las dos partes de una hebra doble de ADN y mide cada una de ellas de manera independiente. Y, dado que sabemos que el número de adeninas ha de ser igual al de timinas (y lo mismo para la guanina y la citosina), una tolerancia de 10 ppm asegura que solo hay una solución válida para ambas hebras simples. Restringir el problema a dos hebras unidas según las reglas de Watson y Crick forma parte del algoritmo usado.

Con respecto a la segunda pregunta, la respuesta es afirmativa: al menos en teoría, la técnica sí podría emplearse para caracterizar la microbiota intestinal de una persona, hacerse con una imagen su «enterotipo» y medir los cambios provocados por terapias pre- o probióticas.

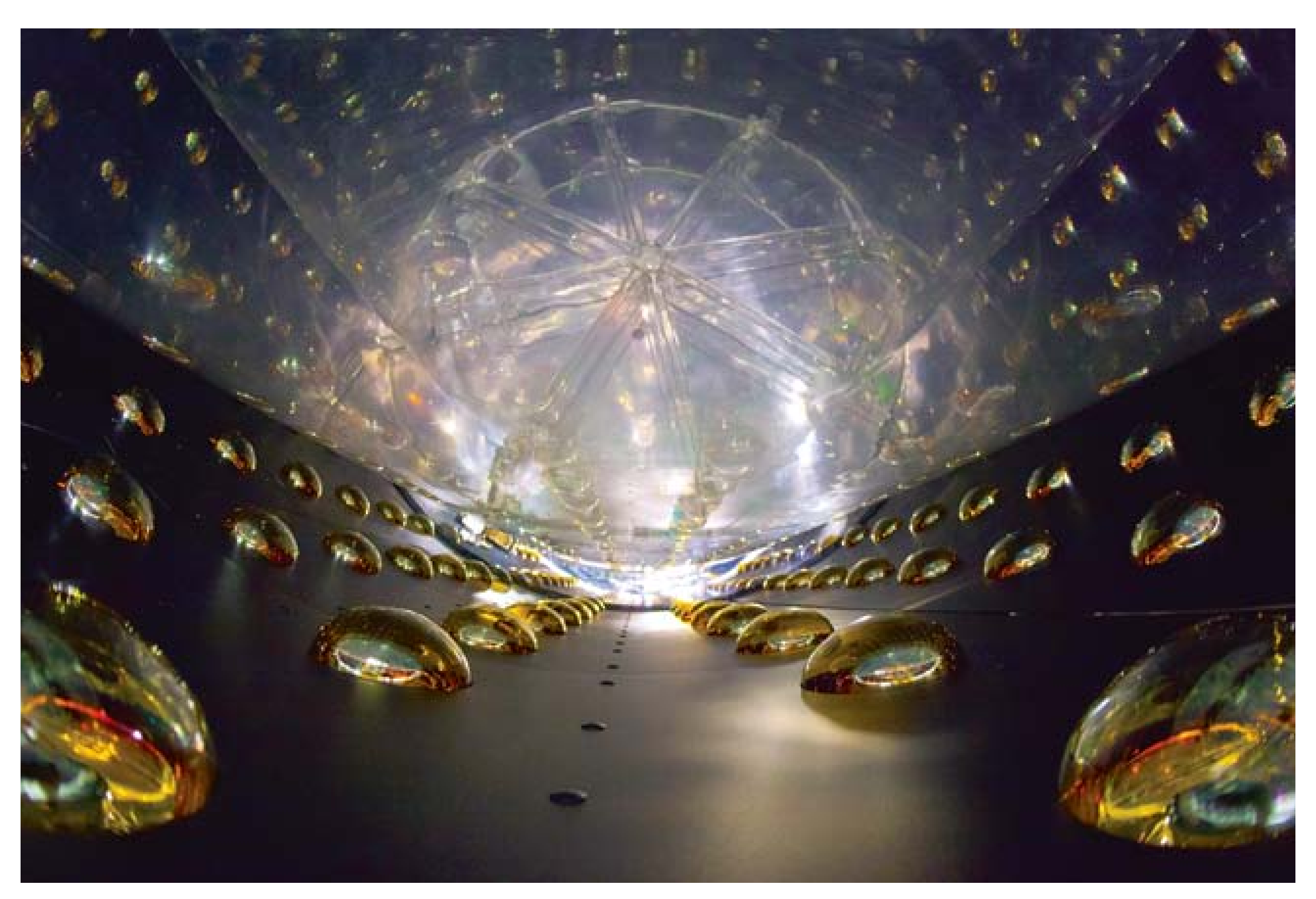
Erratum corrige

Como observa nuestro lector Francisco Román, la escala temporal mencionada en el cuarto párrafo del artículo **La pequeña gran diferencia** [por Gary Stix; Investigación y Ciencia, noviembre de 2014] no puede ser «cientos de miles *de* millones de años»; en su lugar, debería leerse «cientos de miles o millones de años».

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



LOS FOTOMULTIPLICADORES del experimento chino de Daya Bay permiten amplificar la señal que dejan los neutrinos que interaccionan con el detector.

FÍSICA DE PARTÍCULAS

Sin rastro de neutrinos estériles

Se conocen neutrinos de tres tipos, o «sabores»: el electrónico, el muónico y el tauónico. No obstante, algunos físicos creen que podría haber más, si bien su comportamiento sería tan fantasmagórico que apenas interaccionarían con otras partículas. En caso de existir, esos neutrinos «estériles» tal vez ayudasen a resolver algunos de los mayores problemas a los que se enfrenta la física contemporánea. Por ejemplo, podrían dar cuenta de una parte de la materia oscura, la desconcertante sustancia de naturaleza desconocida que parece llenar el universo, pero cuyo único efecto observable es el tirón gravitatorio que ejerce sobre estrellas y galaxias.

Tras varias décadas de búsquedas experimentales, los neutrinos estériles siguen sin aparecer. El último intento al respecto ha tenido lugar en el Experimento de Neutrinos del Reactor de Daya Bay, en China. Pero, después de siete meses de toma de datos, los investigadores tampoco han hallado indicios de estas partículas.

Emplazado bajo un conjunto de reactores nucleares en la provincia de Guangdong, la instalación cuenta con varios detectores de neutrinos enterrados a distintas profundidades. Las reacciones de fisión que se producen en la central generan enormes cantidades de antineutrinos electrónicos. En general, los neutrinos presentan la extraña propiedad de que «oscilan»: de manera espontánea, los de un sabor se transforman en otro. Como consecuencia de ese proceso, algunos de los antineutrinos electrónicos originados en la central china se transforman en antineutrinos muónicos o tauónicos antes de incidir sobre los detectores. Dado que resulta posible calcular de manera aproximada cuántos antineutrinos electrónicos cambian de sabor a lo largo del camino, puede deducirse cuántos deberían llegar al detector más lejano. Si faltan, esa ausencia de partículas podría deberse a la conversión de algunos de ellos en neutrinos estériles.

Según Milind Diwan, investigador de Laboratorio Nacional de Brookhaven y miembro del equipo que llevó a cabo el experimento, los datos no dejan lugar a la existencia de neutrinos estériles dentro de cierto intervalo de masas y otras características físicas. Los resultados aparecieron publicados el pasado mes de octubre en *Physical Review Letters*.

Fuera del espacio de parámetros escrutado hasta ahora por el experimento, la existencia de neutrinos estériles sigue siendo una incógnita. Por el momento, la instalación china continuará buscándolos en un intervalo de características más amplio. Al fin y al cabo, la búsqueda del bosón de Higgs también se vio precedida de treinta años de resultados negativos.

—Clara Moskowitz

CORTESÍA DE ROY KALTSCHMIDT, LABORATORIO NACIONAL LAWRENCE BERKELEY

MICROBIOLOGÍA

Estiércol y resistencia a los antibióticos

La aparición y difusión de los antibióticos propició su uso indiscriminado por parte de los ganaderos, que añadían estreptomicina líquida a los piensos para acelerar el crecimiento de los pollos o en dosis bajas para engordar los cerdos. Ahora sabemos que el abuso de este tipo de fármacos en el ganado promueve el crecimiento de bacterias peligrosas para la salud humana por su resistencia a los antibióticos. Entre los debates en torno al tipo de restricciones que es preciso aplicar, sigue despertando un vivo interés conocer los orígenes de las bacterias resistentes y las rutas que siguen hasta llegar a los humanos.

Jo Handelsman está resiguiendo una de esas rutas que, como ella misma dice, va «del establo a la mesa». Handelsman, microbióloga y actualmente directora asociada para la ciencia en la Oficina de Política Científica y Tecnológica de la Casa Blanca, ha estudiado las vacas lecheras, que reciben con frecuencia antibióticos y generan estiércol con el que los agricultores abonan los campos. Además de nutrientes, este fragante fertilizante puede albergar bacterias resistentes a los antibióticos, lo cual supone un problema, porque los microbios entran en contacto con las plantas que acaban en los supermercados y a veces son consumidas crudas.

Para desentrañar el origen de las bacterias resistentes, en 2013 Handelsman y sus colaboradores de la Universidad Yale abonaron parterres con estiércol de una granja cercana de Connecticut. El estiércol procedía de vacas que no habían recibido antibióticos. Pero para su sorpresa comprobaron que el suelo abonado contenía más bacterias portadoras de genes de resistencia que el enriquecido con un fertilizante nitrogenado sintético, a pesar de que las vacas no habían sido medicadas. El equipo publicó su trabajo el pasado octubre en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

Estudios previos habían descubierto que el estiércol de los cerdos tratados con antibióticos contenía bacterias resistentes, tales como *Escherichia coli*; pero los resultados de las boñigas de vaca apuntan a otros promotores de la resistencia que nada tienen que ver con el uso de los antibióticos. Algo del propio estiércol tiene que estimular la proliferación de las bacterias dotadas de resistencia natural.

Los resultados, empero, no deben hacer pensar que estas campan a sus anchas, matiza Lance Price, microbiólogo de la Universidad George Washington (ajeno al estudio). La resistencia generalizada no es inevitable, asegura. «Es posible controlarla. Tenemos datos inequívocos de que si cerramos el grifo de los antibióticos, las bacterias resistentes disminuyen».

En el próximo paso del periplo de la granja a la mesa, Handelsman analizará si los rábanos cultivados en suelos abonados con estiércol de vaca pueden adquirir genes bacterianos de resistencia a través del sistema radicular. «Poseen venas como nosotros. Hasta hoy no tenemos ninguna prueba de que estén absorbiendo bacterias, pero es una posibilidad realmente interesante», asegura. —*Peter Andrey Smith*

THOMAS FUCHS (*estiércol*); BROWN BIRD DESIGN (*marcapasos*)

BIOINGENIERÍA

Marcapasos de cuerda automática

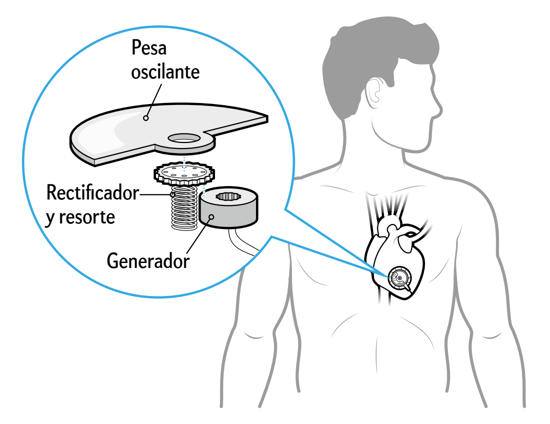
Los marcapasos electrónicos regulan el latido cardíaco de más de tres millones de personas solo en EE.UU. Para estos pacientes, las operaciones quirúrgicas son algo corriente. Las pilas del marcapasos tienen una autonomía de entre cinco y ocho años, y los electrodos que lo conectan con el corazón también se desgastan.

Dispuestos a eliminar por completo las pilas y los electrodos, ingenieros biomédicos de la Universidad de Berna han ideado un marcapasos impulsado por los latidos del corazón que se inspira en un mecanismo de cuerda automática con más de dos siglos de antigüedad.

Los relojes de pulsera automáticos, inventados en 1777, contienen un rotor dotado de un contrapeso que gira cuando el usuario mueve el brazo. El rotor comprime progresivamente un resorte que cuando se estira hace girar los engranajes del reloj. En las versiones modernas, el juego de engranajes acciona un diminuto generador eléctrico.

El equipo suizo descubrió que, igual como lo hace el vaivén de la muñeca, el corazón latiente puede enrollar un resorte. Los investigadores desmontaron un reloj de pulsera automático y separaron el mecanismo de cuerda de los demás componentes, introdujeron el mecanismo en un estuche de 3 centímetros de anchura y lo implantaron en el corazón de un cerdo vivo. El prototipo generó 50 microvatios de potencia; los marcapasos solo necesitan unos diez.

El montaje del dispositivo experimental es enrevesado, aclara Adrian Zurbuchen, quien dio a conocer los pormenores del invento en el Congreso de la Sociedad Europea de Cardiología celebrado a finales del verano pasado. Unos cables conectan el mecanismo de relojería a una caja que alberga la electrónica y un marcapasos. El objetivo es integrarlo todo en uno. Spencer Rosero, director de la clínica de marcapasos del Centro Médico de la Universidad de Rochester, que no participó en el proyecto, prevé que todavía tardará algún tiempo en estar listo. Opina que si las pruebas culminan con éxito, la medicina podría disponer por primera vez de un marcapasos híbrido equipado con una pila y componentes captadores de energía. —*Prachi Patel*



ASTROFÍSICA

El polvo de un sistema planetario similar al nuestro

La estrella Tau Ceti, a tan solo 12 años luz de la Tierra, se parece tanto al Sol que varios relatos de ciencia ficción se han referido a ella. También fue la primera donde, hace ya medio siglo, se buscaron señales de vida inteligente. Su interés aumentó en 2012, cuando los astrónomos hallaron indicios de que cinco posibles planetas algo mayores que la Tierra podrían estar orbitando alrededor del astro a una distancia menor de la que separa a Marte del Sol; uno de ellos, de hecho, parecía encontrarse en la zona habitable.

Hace poco, unas imágenes infrarrojas captadas por el observatorio espacial Herschel han esclarecido aún más la estructura del sistema planetario de Tau Ceti, al mostrar con mayor detalle su cinturón de polvo.

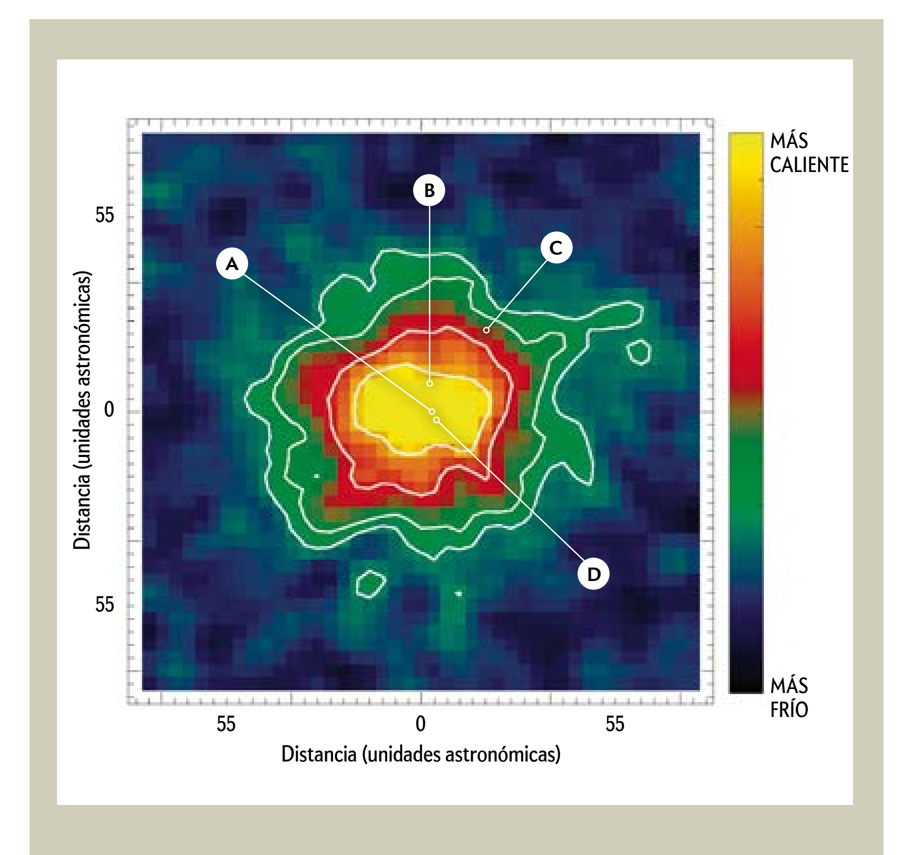
El polvo se crea en las colisiones entre asteroides y cometas, por lo que su localización revela las órbitas de estos objetos, demasiado pequeños para verlos por medios directos. Según explica Samantha Lawler, de la Universidad de Victoria en la Columbia Británica, el cinturón de polvo de Tau Ceti cuenta con una gran extensión.

El pasado mes de noviembre, el grupo de investigación de Lawler comunicó que el borde interior del cinturón se encontraría a unas dos o tres unidades astronómicas (UA) de la estrella; es decir, a la misma distancia que la que media entre el Sol y nuestro cinturón de asteroides. El polvo de Tau Ceti se extiende hasta las 55 UA. Trasladada al sistema solar, esa distancia abarcaría hasta un poco más allá del cinturón de Edgeworth-Kuiper: el inmenso anillo exterior de objetos pequeños entre los que destacan Plutón y otros planetas enanos. Cabe suponer que el cinturón de polvo de Tau Ceti bulle con asteroides y cometas; sin embargo, Lawler considera muy poco probable que incluya un planeta tan grande como Júpiter, ya que la gravedad de un objeto semejante habría expelido la mayor parte de las rocas de poco tamaño.

De aquí a un año, la red de radiotelescopios ALMA, en Chile, proporcionará una vista más nítida del disco de Tau Ceti, sobre todo de su borde interior. Esas imágenes servirán para deducir si los cinco supuestos planetas son reales o no: si el disco se solapa con sus presuntas órbitas, lo más probable será que no existan, ya que en caso de estar allí habrían limpiado la zona de asteroides y polvo.

Si se confirmase la existencia de esos planetas, el grupo de Lawler cree que el sistema de Tau Ceti vendría a ser una especie de sistema solar sin los cuatro planetas gigantes (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno): con algunos planetas menores cercanos a la estrella y, más allá, solo asteroides, cometas y polvo.

—Ken Croswell



Un vistazo a Tau Ceti

Esta imagen en infrarrojos, publicada el 1 de noviembre del año pasado en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, muestra el cinturón de polvo de Tau Ceti con una precisión hasta ahora desconocida.

A TAU CETI. La estrella, en el centro de la imagen, calienta las partículas de polvo que orbitan a su alrededor.

B POLVO CALIENTE. El polvo radia ese calor en forma de infrarrojos, banda espectral en la que observa el telescopio espacial Herschel. El color amarillo denota la radiación más brillante, procedente de las partículas más cercanas a la estrella y, por tanto, las más calientes.

C RESIDUOS FRÍOS. El rojo corresponde a polvo a menor temperatura; el verde, a las partículas más frías y lejanas.

D PLANETAS. Los cinco posibles planetas de Tau Ceti se encontrarían tan cerca de la estrella que, a esta escala, costaría ver sus órbitas.

CORTESÍA DE GRANT KENNEDY (UNIVERSIDAD DE CAMBRIDGE) Y SAMANTHA LAWLER (UNIVERSIDAD DE VICTORIA)

FISIOLOGÍA

Lo que podemos aprender de osos y ardillas

La hibernación es una solución compleja para un problema sencillo. El alimento escasea en invierno y, para sobrevivir a esta hambruna, algunos animales, como la ardilla terrestre ártica y el oso negro, entran en un estado de dormición en el que una serie de cambios fisiológicos los mantienen vivos a pesar de la carencia de alimento, agua y movimiento. A los investigadores y los médicos les interesa saber si esos trucos de la hibernación podrían ayudar a mejorar la salud humana. Las estrategias que emplean los animales sugieren las siguientes ideas para hacer frente a determinadas afecciones.

—Amy Nordrum

ICTUS El riego sanguíneo del cerebro de la ardilla terrestre ártica se reduce a una décima parte de lo normal cuando entra en hibernación. Semejante escasez de oxígeno provocaría en circunstancias normales un ictus. Pero la ardilla despierta del largo invierno porque ralentiza el metabolismo hasta el 2 por ciento de la tasa estival, por lo que necesita mucho menos oxígeno para sobrevivir. Si el personal sanitario de las ambulancias pudiera reducir de modo similar el metabolismo de los pacientes con ictus —tal vez enfriando el cuerpo—, se podrían evitar las lesiones cerebrales permanentes, explica Brian Barnes, biólogo de la Universidad de Alaska en Fairbanks.

DIABETES Las personas obesas suelen dejar de responder a la insulina. La hormona regula la cantidad de glucosa que las células absorben de la sangre; el exceso de azúcar en la sangre provoca la diabetes de tipo 2. Pero los osos pardos engordan más de cincuenta kilogramos cada otoño y no contraen diabetes. Un estudio reciente comprobó que los adipocitos de estos animales aumentan su sensibilidad a la insulina a medida que se acerca el invierno, lo que les permite seguir asimilando y almacenando más azúcares. Los científicos de la empresa biotecnológica Amgen intentan averiguar si podrían obtener resultados parecidos ajustando la misma proteína que controla la sensibilidad en las personas diabéticas.

OSTEOPOROSIS Si una persona permanece largo tiempo inmóvil en ayuno sus huesos comienzan a descomponerse lentamente. En cambio, el oso negro emerge de la madriguera después del invierno tan fuerte como de costumbre porque durante la hibernación el tejido óseo se ha reciclado a una cuarta parte del ritmo normal. Investigadores de la Universidad estatal de Colorado pretenden identificar las hormonas que controlan ese valor extremo de recambio óseo. El propósito es crear un fármaco para las personas con riesgo de osteoporosis que proteja la densidad ósea.

CARDIOPATÍA Durante las intervenciones cardíacas, el paciente queda privado de oxígeno cuando el corazón cesa de latir. Para hacer frente a esta situación, el cuerpo adopta el metabolismo anaeróbico. Por desgracia, el cambio genera ácido láctico, que puede destruir las células si se acumula en exceso. Las ardillas árticas no sufren daños de esa naturaleza durante la hibernación, probablemente porque descomponen más grasas que azúcares, incluso después de que el corazón haya ralentizado su ritmo a un latido por minuto. La Universidad Duke, en cooperación con la Universidad de Alaska en Fairbanks, intenta descubrir de qué modo la ardilla moviliza primero la grasa como combustible en condiciones de escasez de oxígeno. Hallar una manera de inducir ese estado en los pacientes sometidos a cirugía cardíaca reduciría las lesiones orgánicas durante las intervenciones.





LOS OSOS PARDOS llegan a hibernar hasta ocho meses.

ALAMY (*oso*); CORTESÍA DE LA FUNDACIÓN JOAN ORÓ (*Joan Oró*)

AGENDA

CONFERENCIAS

12 de enero
Materiales para baterías: La química es la clave
Rosa Palacín, Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona
Residencia de Investigadores del CSIC
Barcelona
www.residencia-investigadors.es

5 de febrero
Cáncer. Presente y futuro
José A. García Sanz, Centro de Investigaciones Biológicas (CSIC)
Proyecto Ciudad Ciencia
Miranda de Ebro
www.ciudadciencia.es

EXPOSICIONES

Hasta el 8 de enero
Joan Oró, científico humanista
Auditorio Enrique Granados
Lérida
www.paeria.cat/anyoro



Hasta el 15 de febrero
Nikola Tesla. Suyo es el futuro
Espacio Fundación Telefónica, Madrid
http://espacio.fundaciontelefonica.com/nikola-tesla

Nuevo espacio
Biotecnología. Calidad de vida
Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
Alcobendas
www.muncyt.es

OTROS

23 de enero – Conversaciones
Pedro Duque, Agencia Espacial Europea
Antonio San José, periodista
Fundación Juan March, Madrid
www.march.es

30 de enero – Café científico
Física cuántica
Teresa Barriuso,
Universidad de Cantabria
Café de las Artes, Santander
www.unican.es/campus-cultural > Divulgación Científica

TECNOLOGÍA

Conexiones para una red cuántica

Un nuevo dispositivo optomecánico logra convertir señales eléctricas de radiofrecuencia en luz láser. El sistema podría constituir la pieza clave de una futura red cuántica de comunicaciones por fibra óptica

MIKA A. SILLANPÄÄ Y PERTTI J. HAKONEN

Los ordenadores cuánticos están a la vuelta de la esquina. De hecho, el empleo de técnicas de computación basadas en la física cuántica ya ha encontrado su nicho en algunas aplicaciones particulares. Tales máquinas realizan sus operaciones manipulando bits cuánticos, o qubits. Debido a su naturaleza cuántica, los estados de un qubit no se limitan a los valores clásicos 0 y 1, sino que pueden también corresponder a una combinación simultánea de ambos. Como consecuencia, pueden almacenar más información que sus análogos clásicos.

Un ordenador cuántico podría ejecutar una gran variedad de tareas mucho más rápido que los mejores superordenadores del mundo, presentes y futuros. Pero, dejando a un lado su potencia computacional, antes o después los ordenadores cuánticos necesitarán conectarse en una red que no degrade el carácter cuántico de la información que circula por ella. En un artículo publicado el pasado mes de marzo en la revista *Nature*, un grupo de investigadores liderado por Eugene Polzik, del Instituto Niels Bohr de Copenhague, refirió la creación de un dispositivo que bien podría constituir el primer paso hacia una futura red de computación cuántica.

Su diseño se basa en la optomecánica, un campo de investigación muy activo y consolidado que estudia la interacción entre la radiación electromagnética y el movimiento de estructuras mecánicas. Cuando un fotón se refleja en un espejo, ejerce una minúscula fuerza sobre él. Dicho efecto puede amplificarse si el fotón se emplaza en el interior de una cavidad; por ejemplo, entre un par de espejos muy reflectantes que permitan que el fotón rebote repetidas veces de uno a otro.

La optomecánica de cavidades ha avanzado a pasos agigantados durante los últimos años. Hasta ahora, sin embargo, nadie había logrado convertir señales de radio en señales ópticas preservando, al mismo tiempo, la información cuántica almacenada en las ondas de radio.

Proteger el régimen cuántico

Con independencia de cómo terminen siendo los futuros ordenadores cuánticos y sus plataformas de qubits, lo que parece claro es que funcionarán mediante señales electromagnéticas de radio o de microondas, ya que ese es el intervalo de frecuencias en el que operan los diseños de qubits actuales con más posibilidades de integrar procesadores complejos.

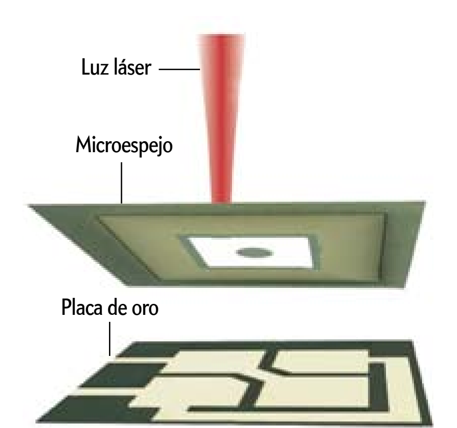
Dado que las señales ópticas pueden transmitirse con gran eficiencia a través de fibras ópticas, una conversión radio-óptica permitiría emplear tales fibras en la comunicación de procesadores cuánticos. Es aquí donde el dispositivo desarrollado por el grupo de Polzik cobra importancia. Su trabajo ha demostrado la viabilidad de una conversión radio-óptica eficiente; una técnica que, en principio, podría implementarse en plataformas de qubits basadas en superconductores.

El dispositivo en cuestión consta de una micromembrana de nitruro de silicio parcialmente recubierta con aluminio, lo que aumenta su reflectividad y le permite actuar a modo de microespejo. Pero la capa de aluminio desempeña una segunda misión: lograr que la membrana conduzca la electricidad y pueda interaccionar con señales eléctricas.

En el sistema propuesto por los autores, dicha interacción se consigue gracias a que la micromembrana actúa como una de las placas de un condensador unido a un circuito, en el que también hay una bobina. La combinación del condensador y la bobina crea una cavidad para las ondas eléctricas, la cual se acopla al movimiento de la micromembrana. Al aplicar una señal eléctrica al circuito, la micromembrana se pone en movimiento. A su vez, dicho movimiento modula la intensidad de reflexión de un láser focalizado sobre la membrana, lo que cierra el ciclo de conversión radio-óptica.

Ese tipo de conversión constituye una técnica estándar en la transmisión de información. Por regla general, se logra usando fotoemisores, fotodetectores o cristales cerámicos cuyas propiedades puedan ajustarse por medio de un voltaje externo. La diferencia fundamental entre estos sistemas y el dispositivo de Polzik y sus colaboradores reside en que este último puede operar también en el régimen cuántico, algo imposible de conseguir con las técnicas tradicionales.

Aunque los autores no llegaron a comprobar explícitamente el funcionamiento en dicho régimen, la eficiencia de la conversión radio-óptica se sitúa varios órdenes de magnitud por encima de los valo-



OPTOMECÁNICA CUÁNTICA: Una futura red de fibra óptica que conecte ordenadores cuánticos deberá poder transformar señales de radiofrecuencia en luz. Para ello, una pequeña membrana (*arriba*) y una placa de oro acoplada a un circuito (*abajo; el circuito no se muestra*) forman un condensador de placas paralelas. La membrana actúa como un microespejo optomecánico sobre el que un haz de luz láser induce un ligero movimiento. Dado que la capacidad del condensador depende de la distancia entre las placas, el sistema permite convertir un pulso óptico en señales eléctricas de radiofrecuencia, y viceversa.

DE: «OPTICAL DETECTION OF RADIO WAVES THROUGH A NANOMECHANICAL TRANSDUCER», T. BAGCI ET AL. EN *NATURE*, VOL. 507, PÁGS. 81-85, MARZO DE 2014.

res alcanzados por las técnicas estándar. Una vez que el dispositivo opere en el régimen cuántico, será posible emplearlo en experimentos de mecánica cuántica y como componente clave de una hipotética red cuántica de comunicaciones.

El nuevo dispositivo supera las especificaciones de los amplificadores electrónicos disponibles hoy en el mercado e incluso las de aquellos que aún se encuentran en fase de desarrollo, como los amplificadores electromecánicos de bajas temperaturas. Los autores han logrado estas sorprendentes características debido a que la detección final se efectúa por medio de un haz láser que introduce muy poco ruido en el sistema, una diferencia fundamental entre el nuevo dispositivo y otros conversores.

Aparte de su potencial como pieza clave en una futura red cuántica de comunicaciones, el invento podría acabar reemplazando a algunos amplificadores de bajo ruido en aplicaciones que requieren trabajar con intervalos de frecuencias muy estrechos, como los sistemas de imagen de alta resolución por resonancia magnética.

Las futuras mejoras del sistema deberán hacer frente a diversos desafíos, como detectar frecuencias más altas (microondas, ya que son estas las que emplean la mayoría de sus aplicaciones potenciales) o perfeccionar el procesado de la señal óptica de salida. Se trata, en cualquier caso, de un campo de investigación cuyo desarrollo futuro promete un enorme interés.

—Mika A. Sillanpää
Departamento de física aplicada
Universidad Aalto, Finlandia

—Pertti J. Hakonen
Laboratorio O. V. Lounasmaa
Universidad Aalto, Finlandia

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 507, págs. 45-46, 2014. Traducido y adaptado con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2014

PARA SABER MÁS

Microwave amplification with nanomechanical resonators. F. Massel et al. en *Nature*, vol. 480, págs. 351-354, diciembre de 2011. Disponible en **arxiv.org/abs/1107.4903**

Superconducting circuits for quantum information: An outlook. M. H. Devoret y R. J. Schoelkopf en *Science*, vol. 339, págs. 1169-1174, marzo de 2013.

Optical detection of radio waves through a nanomechanical transducer. T. Bagci et al. en *Nature*, vol. 507, págs. 81-85, marzo de 2014.

INGENIERÍA

¿Imprimiremos casas en el espacio?

Por qué la fabricación digital cambiará nuestro mundo y por qué todavía no lo ha cambiado

JOAQUIM MINGUELLA CANELA

La fabricación digital y, en concreto, la impresión en 3D (o fabricación aditiva) suponen una revolución en la forma de concebir, fabricar y distribuir productos. Cada vez más, aparecen en la prensa noticias sobre aplicaciones innovadoras, desarrolladas alrededor de cabezales que imprimen objetos tanto cotidianos como de última generación.

Sin embargo, las primeras patentes sobre técnicas de fabricación aditiva datan de principios de los años ochenta. ¿Cómo es que todavía no se han implantado de forma masiva? ¿Se trata de una «burbuja», más que de una auténtica revolución? ¿Qué retos técnicos deben superarse para que se produzca la adopción de este tipo de avances por parte de los consumidores?

El mercado, el mejor juez

En un mundo donde el mercado es global, la oferta también lo es, y los clientes están acostumbrados a tener todo lo que desean a precios asequibles. Por tanto, ¿qué debería condicionar la técnica con la que se fabrica una pieza? Simplemente, la optimización de costes para cada producto.

Es sencillo, pues, imaginar por qué la fabricación aditiva no ha suplantado a las técnicas de fabricación tradicionales. Hoy en día, imprimir en 3D productos de gran consumo no resulta más económico que fabricarlos masivamente en grandes plantas de producción deslocalizadas. Los equipos de impresión en 3D de escala industrial son todavía muy caros, y los materiales que utilizan tienen también costes muy elevados. Sin embargo, existen dos procesos complementarios a la fabricación que dan valor a lo que puede conseguirse mediante la impresión en 3D: el diseño y el transporte.

Los equipos de fabricación digital permiten materializar diseños imposibles de conseguir por otros medios: montajes salidos directamente de máquina, geometrías interiores que no pueden obtenerse mediante técnicas sustractivas por arranque de viruta y formas biomiméticas o bioinspiradas. Tanto es así que la revolución del diseño digital todavía no ha alcanzado todo lo que es posible fabricar. ¿Por qué?

Si los productos todavía se fabrican mediante las técnicas al uso es porque su diseño se halla limitado por las restricciones que imponen estas técnicas. De ahí que los disipadores de calor de los motores y las piezas estructurales destinadas a resistir esfuerzos, por poner dos ejemplos, se realicen todavía siguiendo geometrías sencillas. La fabricación aditiva permitiría mejorar estos y otros muchos productos al admitir geometrías mucho más complejas.

Es, por tanto, necesario que los expertos desarrollen en profundidad lo que se denomina *diseño para la fabricación aditiva*. En el momento en que los diseñadores sean capaces de exprimir las potencialidades de la fabricación digital, el mercado no querrá tener piezas estándar, sino que demandará productos que deberán ser fabricados mediante impresión en 3D.

Otro de los inconvenientes de la fabricación actual es que suele llevarse a cabo lejos del lugar donde se produce la demanda. Ello enlentece la distribución y, por tanto, dificulta la respuesta a las oportunidades de negocio —algo poco competitivo en un mundo donde el consumo es rápido, las modas son pasajeras

UN ABANICO DE TÉCNICAS

La fabricación aditiva corresponde a un conjunto diverso de más de un centenar de técnicas. Se utiliza una u otra en función de los materiales empleados, los procesos, el uso de las piezas finales e incluso los condicionantes específicos de cada fabricante. La siguiente tabla resume las particularidades de algunas de las técnicas más empleadas en la actualidad.

Técnica	¿En qué consiste?	Aplicaciones habituales	Ventajas	Inconvenientes
SINTERIZADO SELECTIVO POR LÁSER	Sinterizado, capa a capa, de material plástico en forma de polvo, mediante la acción de un láser. (El sinterizado corresponde a un tratamiento térmico destinado a aumentar la fuerza y la dureza de un material; se lleva a cabo a temperaturas por debajo del punto de fusión del mismo.)	Prototipos funcionales y piezas finales que emulan las propiedades de piezas de plásticos técnicos producidas por inyección.	La construcción de las piezas se realiza en una cuba de material en polvo; ello permite imprimir geometrías complejas sin necesidad de material de soporte. Pueden modificarse las propiedades del material de base mediante nanoaditivos como fibras de vidrio o carbono.	Coste de pieza elevado. Las piezas con cambios bruscos de sección pueden sufrir deformaciones debidas al estrés térmico del proceso de fabricación.
ESTEREOLITOGRAFÍA	Polimerización de resina de poliuretano en forma líquida mediante luz ultravioleta.	Prototipos con funciones estéticas, con acabados muy buenos.	Pueden emplearse materiales de color o translúcidos. Admite geometrías complejas y espesores finos.	Coste de pieza muy elevado. La construcción de las piezas se realiza en una cuba de material líquido; ello hace que en las piezas con voladizos muy pronunciados se requiera la realización de soportes que luego deberán ser eliminados.
DEPOSICIÓN DE FILAMENTO FUNDIDO	Extrusión de material termoplástico en forma de bobina de hilo a través de una boquilla calefactora y posterior deposición del material, capa a capa.	Prototipos funcionales o estéticos, para las etapas iniciales de definición de producto.	Coste de pieza muy bajo. Mantenimiento de los equipos muy asequible. Gama de materiales posibles muy amplia.	Peor acabado superficial que con otras técnicas. Proceso muy lento para piezas macizas. Requiere material de soporte para voladizos muy pronunciados.
SINTERIZADO METÁLICO POR LÁSER	Sinterizado de polvos metálicos mediante la acción de un láser.	Piezas funcionales metálicas.	Posibilidad de geometrías complejas y de elevada resistencia térmica. Amplia gama de polvos metálicos.	El acabado superficial final suele requerir un proceso posterior en el centro de mecanizado. Coste de pieza muy elevado. Se obtienen piezas metálicas no macizas.

y los clientes no quieren esperar varios meses para tener un determinado producto, pues en ese momento seguramente habrá quedado anticuado.

La fabricación digital ofrece, en cambio, un servicio personalizado, rápido y en el punto de demanda. Por tanto, puede cambiar totalmente el paradigma actual del transporte de mercancías. En un futuro no muy lejano, los grandes cargueros dejarán de relocalizar productos acabados para transportar materias primas con las cuales fabricar en el punto de demanda. Un sistema mucho más eficiente, dado que las materias primas en bruto ocupan menos espacio y suponen un menor coste efectivo de material transportado.

En fecha reciente, la NASA identificó la fabricación aditiva como una de las tecnologías clave para ser desarrollada y utilizada en sus campañas de vuelo y, por qué no, de establecimiento de colonias en futuros asentamientos extraterrestres. ¿Imprimiremos casas en el espacio? Probablemente sí. Y no solo casas, ni tampoco solo en el espacio: imprimiremos casi de todo en todos los sitios. Lo único que deberá asegurarse será que se trate de productos en los que el diseño (la forma) y el transporte (en coste y en escala de tiempo) desempeñen una función importante. Eso, y vencer los retos técnicos que aún plantea la impresión en 3D después de más de treinta años de vida.

Materiales y propiedades

Actualmente, las técnicas de fabricación aditiva dedicadas a procesos de prototipado rápido, como la sinterización selectiva por láser o la estereolitografía, utilizan polímeros que imitan las propiedades de los plásticos a los que tendrán que emular en su fase final de validación. Estos materiales están especialmente diseñados para tener un buen comportamiento durante la etapa de fabricación. Por ejemplo, en el sinterizado selectivo por láser se utiliza mayoritariamente polvo de poliamida; en la deposición de hilo fundido, en cambio, los equipos más comunes solo son capaces de imprimir en plásticos como el acrilonitrilio butadieno

estireno (ABS) o el biodegradable ácido poliláctico (PLA).

Existe, pues, la necesidad de mejorar los métodos de impresión en 3D para que puedan utilizar los materiales finales reales demandados por los clientes, y no solo meras imitaciones funcionales. En este campo tienen cabida, además de plásticos y metales, materiales habitualmente poco utilizados en la impresión en 3D (cerámicas técnicas avanzadas, pastas alimenticias) u otros con características funcionales añadidas (conductividad, memoria de forma).

Además, las impresoras en 3D más comunes en el mercado solo pueden imprimir pocos tipos de material con cada técnica. Otro reto consiste, pues, en desarrollar sistemas que permitan imprimir casi cualquier material con la misma máquina (e incluso realizar otras operaciones como el acabado, el grabado y el corte por láser), en lugar de necesitar una máquina distinta para cada material que se quiera utilizar.



ESTAS PIEZAS PLÁSTICAS de ácido poliláctico se obtienen mediante impresión en 3D por deposición de filamento fundido; se trata de pequeños elementos estructurales de varios bienes de equipo. Este concepto de impresión de kits de elementos prefabricados podría extenderse a la fabricación de piezas de gran tamaño, capaces de utilizarse en ensamblajes con un factor de escala muy superior, por ejemplo en el sector de la edificación.

FUNDACIÓN PRIVADA CENTRO CIM, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA-BARCELONATECH

Sostenibilidad y eficiencia energética

Históricamente, las técnicas de fabricación por aporte de material han basado gran parte de su propaganda en una supuesta mayor sostenibilidad de los procesos, debida a una mayor eficiencia en la utilización de materias primas. Sin embargo, la realidad demuestra que el volumen de materia prima utilizado siempre es superior al volumen de los productos finales. Las mermas son notables.

Veamos algunos ejemplos. En la estereolitografía, deben fabricarse columnas para soportar partes en voladizo que luego deberán ser retiradas. En la fabricación aditiva metálica, hay que dejar un sobreespesor, es decir, un volumen suplementario de material que deberá ser eliminado posteriormente por algún método de sustracción como el fresado. En el sinterizado selectivo por láser, el material en la plataforma de construcción sufre ciclos de calentamiento y enfriamiento que degradan poco a poco la fracción que no se utiliza para formar la pieza final.

Y los sobrecostes no son únicamente materiales. Los ciclos térmicos del sinterizado, necesarios para poder dar más velocidad de escaneado al láser, entrañan un gasto de energía nada desdeñable, por lo que son bastante ineficientes desde el punto de vista energético. Así pues, algunas de las técnicas de fabricación digital todavía deben mejorar para utilizarse en lugares con escasez de recursos energéticos eléctricos —como serían las bases espaciales.

Innovación abierta

En un mundo global donde se han creado multitud de sitios de encuentro virtual, la comunidad de desarrollo de sistemas de fabricación digital es una de las más dinámicas. Muchos de los desarrollos de nuevas técnicas y máquinas los llevan a cabo empresas con fines lucrativos, pero también existe toda una comunidad de desarrolladores que trabaja con fines más bien sociales, con el espíritu de poder hacer llegar la tecnología a todos los rincones. En materia de *software* podemos citar a Slic3r. En cuanto a la arquitectura de máquinas tenemos a RepRap y a RepRapBCN, una de sus derivadas en España. Por lo que respecta a edificación, una iniciativa muy interesante es la italiana WASP Project, dedicada al desarrollo de sistemas de impresión para materiales de construcción.

Todos esos proyectos colaborativos de desarrollo de sistemas de fabricación libres y abiertos ponen de manifiesto hasta qué punto la llegada de la futura impresión en 3D tendrá como elementos disruptivos muchos agentes simultáneos, y no un único protagonista, como era costumbre antaño.

—Joaquim Minguella Canela
Fundación CIM
Departamento de ingeniería mecánica
Universidad Politécnica de Cataluña
Barcelona

PARA SABER MÁS

Makers: The new industrial revolution. C. Anderson. Crown. Business; Random House Inc. Nueva York, 2012.
Wohlers Report 2014. Wohlers Associates, 2014. Informe anual sobre la evolución de mercados y técnicas de fabricación aditiva.
Proyecto RepRapBCN: **www.reprapbcn.com**

EN NUESTRO ARCHIVO

Imprimir lo imposible. Larry Greenemeier en *IyC*, agosto de 2013.

INMUNOLOGÍA

Envejecimiento del sistema inmunitario

Si se corrigieran las alteraciones inmunitarias asociadas a la edad, ¿se lograría una vida de mayor calidad y más duradera?

DAVID ESCORS MURUGARREN

Con el paso del tiempo, aunque a menudo no seamos conscientes de ello, nuestro organismo va cambiando. Conforme vamos acumulando décadas, comenzamos a decirnos, con una mezcla de sorpresa y frustración, «... esto a mí no me pasaba antes...». Al cruzar la cuarentena, empiezan a manifestarse ciertos rasgos de la senescencia, como la caída del cabello, la aparición de canas, la pérdida de masa muscular, la acumulación de grasa, etcétera. Y nuestra salud se hace cada vez más delicada.

La mayor predisposición a padecer enfermedades infecciosas y cáncer conforme envejecemos resulta evidente. Las vacunaciones son también menos efectivas. El incremento «natural» de esta vulnerabilidad a la enfermedad hace que las personas fallezcan en muchos casos antes de lo que debieran.

A ello contribuye en gran medida la pérdida de eficacia de nuestro sistema inmunitario. De acuerdo con nuestras investigaciones, en colaboración con el grupo de Arne Akbar, del Colegio Universitario de Londres (UCL, por sus siglas en inglés), este proceso comienza mucho antes de lo que pensamos. En concreto, hemos averiguado que se produce en los linfocitos T y está controlado por una única ruta bioquímica relacionada directamente con el metabolismo celular y los daños que va acumulando con el tiempo el ADN cromosómico.

Un fenómeno programado

El envejecimiento es un proceso fisiológico altamente regulado. Aunque en este artículo no vamos a describirlo con detalle, daremos unas pinceladas que nos sirvan de base. La especie humana está programada genéticamente para vivir unos 130 años. Sin embargo, las personas no suelen alcanzar esa edad porque fallecen antes a causa de complicaciones infecciosas o cáncer. A ello contribuye en gran medida la senescencia de ciertas células.

Pero ¿cómo se regula genéticamente el tiempo de vida de una célula en nuestro organismo? Cada célula contiene en los extremos de los cromosomas unas secuencias de ADN llamadas telómeros. Estos resultan necesarios para que el ADN cromosómico se duplique durante la división celular, y son sintetizados por la enzima telomerasa. Sin embargo, la mayoría de las células de nuestro cuerpo (células somáticas) no producen telomerasa, por lo que los telómeros se van acortando inevitablemente en cada división. Llega un momento en el que son tan cortos que ya no pueden realizar su función durante la duplicación cromosómica, de modo que la célula deja de dividirse y muere. Los telómeros actúan como un reloj interno celular: su longitud determinará el número máximo de divisiones que una célula somática puede realizar.

Pero hay varias excepciones a esta regla. Las células madre de nuestro organismo, que sí producen telomerasa, no pierden su capacidad de diferenciación pluripotencial. Ello explica, por ejemplo, que se necesiten muy pocas células madre hematopoyéticas para reconstituir por completo el sistema hematopoyético, un proceso que exige un número muy alto de divisiones celulares. Otra excepción son los linfocitos T, que también producen telomerasa, aunque no de modo indefinido.

Auge y declive de los linfocitos T

El sistema inmunitario, constituido por células preparadas para la detección y neutralización de los patógenos, suele dividirse funcionalmente en dos partes: el sistema innato y el adaptativo. La respuesta innata es la más rápida y constituye una medida de contención inicial frente a una agresión. La respuesta adaptativa se basa en la captura y procesamiento del patógeno por parte de unas células especializadas, las células presentadoras de antígenos. Se encargan de «despiezar» los patógenos en trocitos, llamados péptidos antigénicos, y los presentan como si fueran un DNI a los linfocitos T. Estos poseen unas moléculas en su superficie, los receptores del linfocito T (*T cell receptor*, TCR), que reconocen (como si fuera un lector automático del DNI) los péptidos antigénicos.

Tras ese reconocimiento, los linfocitos se activan y proliferan exponencialmente para atacar y destruir a los patógenos. El objetivo consiste en generar tantos linfocitos T como sea posible para que circulen por todo el organismo y eliminen los peligros. Los linfocitos deben esa enorme capacidad de multiplicación a la telomerasa que producen. Y todo este sistema funcionaría perfectamente durante la vida de las personas si no fuera porque los linfocitos T también envejecen.

Conforme vamos cumpliendo años, nuestros linfocitos T sintetizan cada vez menos TCR y telomerasa, por lo que merma su capacidad de división y reacción frente a las enfermedades. Estos linfocitos T senescentes se van acumulando con el tiempo en nuestro organismo. ¿Cuál es el alcance de este proceso en las personas?

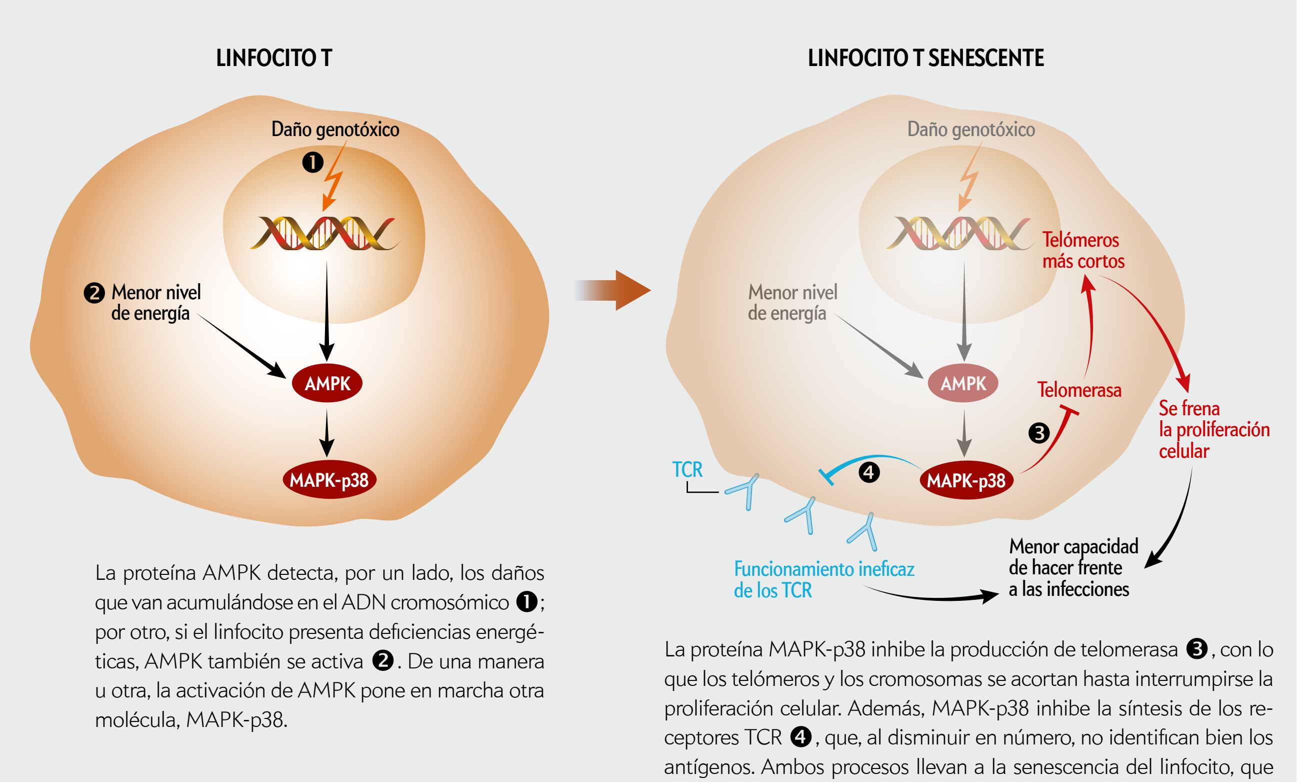
Cuando iniciamos el estudio sobre el envejecimiento del sistema inmunitario en el UCL, doné sangre a mi estudiante de doctorado, Alessio Lanna, para que la analizara. Cuál fue mi sorpresa cuando me dijo que entre el 30 y el 35 por ciento de mis linfocitos T eran senescentes. ¡Yo no había cumplido los cuarenta todavía! Aunque pueda sorprender al lector, ese porcentaje resulta normal. Y en una persona de setenta años alcanza entre el 70 y el 80 por ciento. Obviamente, ello tiene un profundo impacto en nuestra salud. Ahora podemos entender por qué, al llegar a ciertas edades, hasta un simple resfriado puede terminar con la vida de una persona.

Al investigar los mecanismos que controlan la senescencia en los linfocitos T, llegamos a un hallazgo sorprendente. Identificamos una proteína cinasa, llamada AMPK, que era la responsable del envejecimiento de los linfocitos T. Esta molécula funciona como un sensor metabólico y genotóxico, esto es, se activa ante alteraciones del metabolismo o del ADN celular. Una vez activada, AMPK fosforila a su vez a otra cinasa, MAPK-p38, la cual frena la expresión de la telomerasa e interrumpe el ciclo celular.

Parece lógico pensar que tal mecanismo opere conforme envejecemos, ya que

LA SENESCENCIA DE LOS LINFOCITOS

A partir de cierta edad, nuestros linfocitos T, un tipo de célula principal del sistema inmunitario, empiezan a envejecer y resultan menos eficaces a la hora de combatir enfermedades. La ruta bioquímica que lleva a la senescencia de estas células está controlada por una proteína, AMPK, que funciona como un sensor metabólico de las posibles alteraciones que se producen en el linfocito.



La proteína AMPK detecta, por un lado, los daños que van acumulándose en el ADN cromosómico ❶; por otro, si el linfocito presenta deficiencias energéticas, AMPK también se activa ❷. De una manera u otra, la activación de AMPK pone en marcha otra molécula, MAPK-p38.

La proteína MAPK-p38 inhibe la producción de telomerasa ❸, con lo que los telómeros y los cromosomas se acortan hasta interrumpirse la proliferación celular. Además, MAPK-p38 inhibe la síntesis de los receptores TCR ❹, que, al disminuir en número, no identifican bien los antígenos. Ambos procesos llevan a la senescencia del linfocito, que combate peor las enfermedades.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR

con el tiempo vamos acumulando cambios en nuestro ADN celular por acción de mutágenos, luz ultravioleta, radicales libres, etcétera. Pero lo más interesante es que AMPK también se activa cuando escasean los nutrientes intracelulares, entre ellos el ATP, la moneda energética de la célula. En conclusión, las características funcionales de la senescencia en los linfocitos T están controladas por una misma molécula en la que convergen señales del metabolismo celular y de los daños en el material genético de la célula.

Además de descubrir este mecanismo, hemos demostrado que la inactivación de los linfocitos T debida a la senescencia puede revertirse inhibiendo la actividad de esta ruta de control. El uso de inhibidores químicos de MAPK-p38 hace que los linfocitos T senescentes recuperen la expresión de la telomerasa y su capacidad proliferativa. El silenciamiento de AMPK, de MAPK-p38 y de otras proteínas implicadas en este proceso mediante técnicas de manipulación genética con lentivectores (vectores víricos del género *Lentivirus*) también anula la inactivación de los linfocitos. Hemos logrado así que los linfocitos T senescentes recuperen su funcionalidad.

¿El fin del envejecimiento?

Las implicaciones prácticas de nuestros estudios resultan evidentes, ya que se podrían diseñar nuevos medicamentos que interfirieran específicamente con MAPK-p38 en los linfocitos T. Un sistema inmunitario renovado de este modo ofrecería a los mayores una mejor calidad de vida y permitiría luchar eficazmente contra la gripe, neumonías y cáncer, unas enfermedades devastadoras en las últimas etapas de la vida.

Pero lo que parecería la «llave mágica» para lograr una vida más larga, más sana y de mayor calidad trae consigo algunos inconvenientes. ¿Resulta realmente perjudicial el envejecimiento de los linfocitos? ¿Cuál es la interpretación fisiológica de los resultados que hemos obtenido? Obviamente, si los linfocitos no disponen de suficiente energía para funcionar, lo mejor es desactivarlos. Su senescencia representa, por tanto, una manera de conservar la energía en el conjunto del organismo en el caso de que se produzcan deficiencias nutricionales.

Más graves aún son las agresiones genotóxicas. Si los linfocitos acumulan muchos daños (mutaciones) en el ADN, pueden transformarse en células tumorales y ocasionar linfomas. De ahí que pueda compensar ir desactivándolos con el tiempo, aunque como contrapartida se pierda capacidad de lucha contra las infecciones y el cáncer.

Por consiguiente, ¿resulta ventajoso contrarrestar la inactivación de los linfocitos T senescentes si hay riesgo de ocasionar linfomas? Habría que hacer un balance entre los riesgos y beneficios que se obtienen, antes de manipular la senescencia de los linfocitos T, un proceso que en condiciones normales se halla altamente regulado a nivel metabólico y genético.

Nuestro grupo se propone precisamente profundizar en este aspecto. Con-

tinuamos investigando sobre las bases de este fascinante mecanismo de regulación inmunitaria y sobre cómo utilizarlo terapéuticamente para el beneficio del paciente.

—David Escors Murugarren
Grupo de Investigación en Inmunomodulación
Navarrabiomed-Fundación Miguel Servet Pamplona

PARA SABER MÁS

Lentiviral vectors in gene therapy: their current status and future potential. D. Escors y K. Breckpot en *Archivum Immunologiae et Therapia Experimentalis*, vol. 58, págs. 107-119, 2010.
The kinase p38 activated by the metabolic regulator AMPK and scaffold TAB1 drives the senescence of human T cells. A. Lanna et al. en *Nature Immunology*, vol. 15, págs. 965-972, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Sistema inmunitario y envejecimiento N. López Moratalla en *Biología del envejecimiento*, colección *Temas* de *IyC* n.º 11, 1998.
El sistema inmunitario N. K. Jerne en *Las defensas del organismo*, colección *Temas* de *IyC* n.º 25, 2001.
¿Por qué no somos inmortales? T. Kirkwood en *IyC*, noviembre de 2010.

BIOLOGÍA SINTÉTICA

Biocircuitos sincronizados

Se ha dado un paso adelante en el desarrollo de circuitos celulares sincronizados, un logro que nos acerca a la creación de dispositivos biológicos con posibles aplicaciones médicas

RICARD V. SOLÉ Y JAVIER MACÍA

Uno de los grandes objetivos de la biología sintética es la construcción de redes, fiables y predecibles, de componentes moleculares y celulares que funcionen como dispositivos biológicos para detectar compuestos químicos, fabricar nuevos fármacos o incluso tratar ciertas patologías. Para conseguir tales objetivos, se necesita crear biocircuitos sintéticos complejos que requieren una sincronización de múltiples componentes. Aunque en el ámbito de la electrónica la sincronización está bien arraigada, en las células vivas sigue planteando un gran reto, ya que demanda la correlación de diferentes fenómenos que pueden tener lugar en diferentes escalas de espacio y tiempo. En fecha reciente, Arthur Prindle, de la Universidad de California en San Diego, y sus colaboradores han demostrado la viabilidad de una nueva estrategia para sincronizar los biocircuitos introducidos en bacterias *Escherichia coli*.

En los circuitos complejos, la sincronización sirve para equilibrar dos o más módulos que normalmente operarían en escalas de tiempo diferentes. En consecuencia, si dos componentes responden a distintas velocidades, la sincronización garantiza que el más rápido esperará a que el más lento finalice su labor antes de proseguir con la suya, lo que hará que el sistema actúe como una sola entidad. En los circuitos eléctricos, la sincronización se consigue mediante una señal de reloj (*clock signal*) externa. A modo de ejemplo, si consideramos un oscilador, cuando la señal está en su nivel alto (o bajo), el dispositivo deja de oscilar hasta que esta adquiere su nivel bajo (o alto). Cuando tal idea se aplica a un sistema con múltiples componentes, la señal de reloj puede regular diferentes dispositivos independientes a fin de que trabajen al unísono.

Por desgracia, esta metodología, que se halla estandarizada en la electrónica, no puede trasladarse directamente a los biocircuitos sintéticos. Ello se debe a la inexistencia de una señal precisa que afecte por igual a todos los módulos del dispositivo sintético. El origen de esta dificultad reside en la alta variabilidad que los sistemas biológicos presentan en su respuesta ante un mismo estímulo externo. Como solución al problema, Prindle y sus colaboradores han desarrollado una nueva estrategia para la sincronización rápida y eficiente de dispositivos osciladores en *E. coli*. La novedad consiste en que no se ha recurrido a una señal de reloj externa; en su lugar, se aprovecha como mecanismo de sincronización la propia maquinaria de las células en las que se han introducido los dispositivos sintéticos.

Los módulos

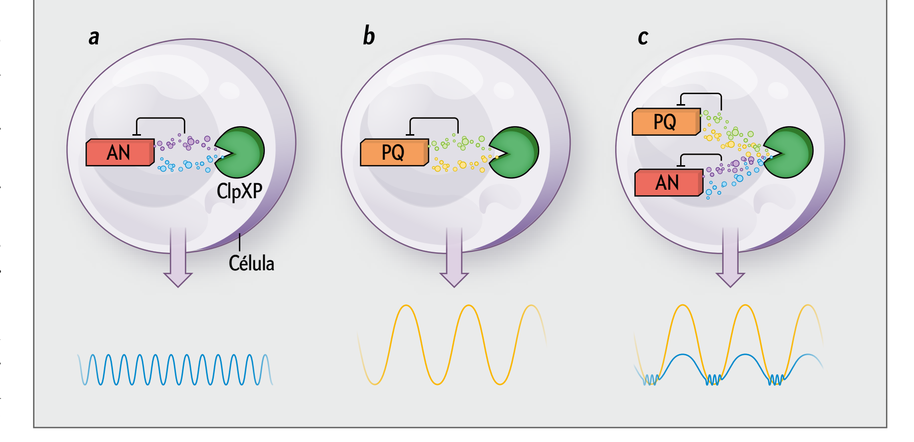
En general, cualquier oscilador se basa en la creación y destrucción periódica de una señal. En algunos dispositivos implementados en bacterias, esta señal está representada por la concentración de una determinada proteína producida por el oscilador. Esta proteína suele inhibir el promotor que regula su propia síntesis, en un proceso de autorregulación negativa. Para generar oscilaciones, la producción de proteínas por parte del oscilador debe ir seguida de la degradación de estas por una enzima proteasa. El equipo de Prindle ha introducido en *E. coli* dos módulos osciladores, previamente desarrollados por separado, que operan en diferentes escalas de espacio y tiempo.

El primero actúa a nivel de cada célula mediante un mecanismo de autorregulación negativa (AN) intracelular. Produce la proteína represora λ, de origen vírico, que inhibe al propio módulo, lo que genera oscilaciones de alta frecuencia y baja amplitud en cada célula. A fin de monitorizar estas oscilaciones, el módulo induce la síntesis de una molécula observable, en este caso una proteína fluorescente cian, cuya producción oscila con la misma alta frecuencia y baja amplitud.

A ese módulo los autores han acoplado otro que genera oscilaciones en toda la población celular y que se basa en el mecanismo que utilizan las bacterias para comunicarse, la percepción de quórum (PQ). En este sistema, cada bacteria segrega al medio extracelular una molécula de señalización cuya concentración depende de la densidad de células. Cuando la población alcanza un tamaño crítico, la concentración de moléculas llega a un nivel tal que induce en las propias bacterias la transcripción de un determinado gen. Pero el módulo PQ no solo produce la molécula de señalización, sino que, además, cuando llega a la concentración crítica, promueve la síntesis de una proteína denominada AiiA. Esta degrada las moléculas generadas por el módulo PQ, es decir, ejerce una

UN NUEVO AVANCE DE LA BIOLOGÍA SINTÉTICA

Un equipo de la Universidad de California en San Diego ha generado un biocircuito sintético complejo introduciendo a la vez dos tipos de osciladores en células de *Escherichia coli*. El primero es un oscilador intracelular de autorregulación negativa (AN), un módulo que opera a nivel de cada célula bacteriana. Produce la proteína represora λ (*púrpura*), que inhibe la actividad del propio módulo, así como una proteína fluorescente cian (*azul*). Ambas son degradadas por las enzimas proteasas ClpXP. Como resultado, se producen oscilaciones de baja amplitud y alta frecuencia que pueden observarse en los niveles de fluorescencia cian emitidos (*ondas azules*) (*a*). El segundo módulo, basado en la percepción de quórum (PQ), produce la proteína AiiA (*verde*) y una proteína fluorescente amarilla (*amarillo*). AiiA degrada las moléculas de PQ e inhibe su actividad mediante un mecanismo de autorregulación negativa. A su vez, ambas proteínas también son degradadas por las proteasas ClpXP. Como resultado, las oscilaciones del módulo PQ se sincronizan en toda la población microbiana, que oscila a bajas frecuencias y alta amplitud (*ondas amarillas*) (*b*). Cuando se introducen ambos módulos en la célula, estos compiten por las proteasas ClpXP y su dinámica se sincroniza (*c*).



autorregulación negativa sobre él. Cuando la población de bacterias que contienen el módulo PQ es suficientemente grande, este induce oscilaciones simultáneas y acopladas en cada célula de la población, caracterizadas por una gran amplitud y una baja frecuencia. Como resultado, este módulo regula la síntesis de una proteína fluorescente amarilla que presenta el mismo patrón de oscilaciones.

Dispositivos enlazados

Prindle ha conseguido acoplar estos dos osciladores aprovechando un componente natural de *E. coli*: la enzima proteasa ClpXP. Para lograrlo, únicamente necesitó añadir a las proteínas (represoras y fluorescentes) de los módulos osciladores unas secuencias de reconocimiento de las proteasas ClipXP. De este modo, la actividad de las proteasas regula la intensidad de la señal que retroinhibe los módulos y la concentración de las proteínas producidas por estos.

Cuando los niveles de proteínas generadas por el módulo PQ son bajos, las proteasas ClpXP degradan la proteína represora λ, con lo que el oscilador AN fluctúa normalmente. Sin embargo, cuando PQ está activo, la cantidad total de proteínas producidas por ambos osciladores es tal que satura la capacidad de degradación de las proteasas ClpXP y el módulo intracelular AN deja de oscilar. Como consecuencia, AN se ajusta al comportamiento de PQ. Una vez que las proteínas sintetizadas por este último han sido degradadas hasta un nivel lo suficientemente bajo, la proteasa ClpXP vuelve a estar disponible para degradar la proteína represora λ otra vez, y el módulo intracelular retorna a su modo normal de oscilación.

La aproximación de Prindle no requiere métodos complejos de ingeniería para sincronizar los osciladores, sino que aprovecha los componentes propios de la célula. En el diseño de dispositivos genéticos se intenta minimizar las interacciones entre los diferentes componentes del biocircuito y la célula que los contiene. Por el contrario, la nueva estrategia se sirve de tales interacciones. De estos resultados se desprende que la exploración de nuevos tipos de interacciones sinérgicas podrían ayudar a la construcción de circuitos en el ámbito de la biología sintética.

El estudio de Prindle ofrece un excelente ejemplo de cómo integrar múltiples componentes sintéticos a partir de la maquinaria celular natural para sincronizar dos módulos de una forma rápida, controlable y robusta. Sin duda, los futuros diseños de nuevos circuitos para la toma de decisiones complejas se verán beneficiados de esta nueva aproximación. No obstante, es importante recordar que aumentar el número de módulos en los biocircuitos sigue siendo uno de los grandes desafíos de la biología sintética.

Si la complejidad de los circuitos ha de crecer, será necesario introducir nuevas mejoras en su diseño. Deberán abordarse distintas estrategias para lograr la sincronización de otros tipos de dispositivos genéticos, como el empleo de puertas lógicas. Diversos trabajos han demostrado que es posible distribuir varias partes de un circuito sincronizado en diferentes tipos celulares, utilizando las propias células como unidades naturales de computación capaces de realizar funciones lógicas básicas como AND o NOR. En este contexto, el uso de distintos tipos celulares que, al comunicarse entre sí, ejerzan diferentes funciones, puede ser el siguiente paso para ampliar el método diseñado por Prindle y sus colaboradores hacia la generación de circuitos de toma de decisiones más complejas.

—Ricard V. Solé y Javier Macía
Departamento de ciencias experimentales y de la salud
Universidad Pompeu Fabra
Barcelona

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 508, págs. 326-327, 2014. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2014

PARA SABER MÁS

A synchronized quorum of genetic clocks. T. Danino, O. Mondragón-Palomino, L. Tsimring y J. Hasty en *Nature*, vol. 463, págs. 326-330, 2010.

Five hard truths for synthetic biology. R. Kwok en *Nature*, vol. 463, págs. 288-290, 2010.

Expanding the landscape of biological computation with synthetic multicellular consortia. R. V. Solé y J. Macía en *Natural Computing*, vol. 12, págs. 485-497, 2013.

Rapid and tunable post-translational coupling of genetic circuits. A. Prindle et al. en *Nature*, vol. 508, págs. 387-391, abril de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Bacterias como micromáquinas. Angel Goñi Moreno en *IyC*, julio de 2012.



NEUROCIENCIA

En el cerebro del meditador

Las nuevas técnicas de neuroimagen arrojan luz sobre los cambios cerebrales que producen las prácticas contemplativas

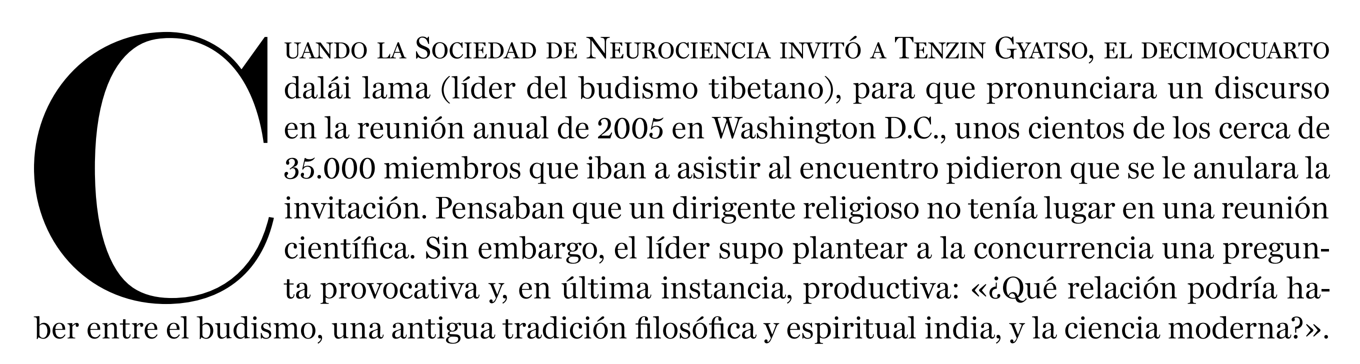
Matthieu Ricard, Antoine Lutz y Richard J. Davidson

MARCOS CHIN

Matthieu Ricard, monje budista, estudió biología celular antes de abandonar Francia hace cuarenta años para convertirse en estudiante del budismo en el Himalaya.

Antoine Lutz es investigador del Instituto Nacional de la Salud e Investigación Médica de Francia, y también trabaja en la Universidad de Wisconsin-Madison. Ha liderado el estudio de la neurobiología de la meditación.

Richard J. Davidson, pionero de la ciencia de la meditación, es director del Laboratorio Waisman de Neuroimagen y Comportamiento, en el Centro para la Investigación de las Mentes Saludables en la Universidad de Wisconsin-Madison.



Cuando la Sociedad de Neurociencia invitó a Tenzin Gyatso, el decimocuarto dalái lama (líder del budismo tibetano), para que pronunciara un discurso en la reunión anual de 2005 en Washington D.C., unos cientos de los cerca de 35.000 miembros que iban a asistir al encuentro pidieron que se le anulara la invitación. Pensaban que un dirigente religioso no tenía lugar en una reunión científica. Sin embargo, el líder supo plantear a la concurrencia una pregunta provocativa y, en última instancia, productiva: «¿Qué relación podría haber entre el budismo, una antigua tradición filosófica y espiritual india, y la ciencia moderna?».

El dalái lama, siguiendo el lema «hechos, no palabras», ya había tratado de responder a esa pregunta. En los años ochenta inició un debate sobre ciencia y budismo que llevó a la creación del Instituto de Mente y Vida, dedicado al estudio de la ciencia contemplativa. En 2000, dio un nuevo enfoque a su empeño. Puso en marcha la subdisciplina de «neurociencia contemplativa» al proponer a los científicos que estudiaran la actividad cerebral de meditadores budistas expertos (con más de 10.000 horas de práctica).

Durante casi quince años, más de cien practicantes del budismo monacales y laicos, así como numerosos principiantes, han participado en los experimentos científicos de la Universidad de Wisconsin-Madison y al menos otras 19 universidades más. El presente artículo, de hecho, es el producto de una colaboración entre dos neurocientíficos y un monje budista que inicialmente se formó como biólogo celular.

La comparación de las imágenes cerebrales de meditadores expertos con las de neófitos y no meditadores ha permitido empezar a vislumbrar por qué este conjunto de técnicas de entrenamiento mental puede proporcionar beneficios cognitivos y emocionales. Los objetivos de la meditación, de hecho, se solapan con muchos de los de la psicología clínica, la psiquiatría, la medicina preventiva y la educación. Según indican cada vez más datos, la meditación puede ser un tratamiento eficaz para la depresión y el dolor crónico y, además, ayuda a cultivar una sensación de bienestar general.

El descubrimiento de los beneficios de la meditación coincide con hallazgos recientes en neurociencia que demuestran que el cerebro adulto todavía puede transformarse profundamente a través de la experiencia. Tales datos revelan que, cuando aprendemos a hacer malabares o a tocar un instrumento, el cerebro experimenta cambios a través de un proceso llamado neuroplasticidad. La región del cerebro que controla el movimiento de los dedos de un violinista se va agrandando conforme aumenta el dominio del instrumento. Cuando meditamos parece ocurrir un proceso similar. Nada varía en el ambiente que rodea al meditador, pero este regula sus estados mentales para alcanzar una forma de mejora interna, una experiencia que afecta al

EN SÍNTESIS

La meditación constituye una actividad antigua que, de alguna manera, forma parte de casi todas las religiones del mundo. Su práctica, derivada de varias ramas del budismo, se ha abierto camino en el mundo secular durante los últimos años como un modo de promover la calma y el bienestar general.

Tres formas de meditación comunes (atención focalizada, consciencia plena y compasión) se practican ahora en todas partes, desde hospitales hasta colegios; cada vez más, se han ido sometiendo al escrutinio científico en laboratorios de todo el mundo.

La meditación produce cambios fisiológicos en el cerebro, como en el volumen tisular de determinadas áreas. Quienes la practican también experimentan efectos psicológicos beneficiosos: reaccionan más rápido a los estímulos y son menos propensos a sufrir ciertas formas de estrés.

Diversidad de experiencias contemplativas

Los avances en neuroimagen y en otras técnicas han permitido entender mejor lo que sucede en el cerebro durante las tres principales formas de meditación budista (atención focalizada, consciencia plena y compasión y benevolencia). El diagrama inferior permite hacerse una idea sobre el ciclo de sucesos que tienen lugar durante la meditación del tipo atención focalizada. Se indica también la correspondiente activación de regiones específicas del cerebro.

Atención focalizada

En esta práctica, la persona que medita suele concentrarse en los ciclos de inspiración-espiración. Incluso en un experto, la mente se distrae y debe recuperar la atención sobre el objeto en el que se concentra. En un estudio de neuroimagen de la Universidad Emory se han localizado distintas áreas del cerebro implicadas en los cambios de atención.

Consciencia plena

También llamada atención plena, consiste en observar lo que se ve y se oye, así como las sensaciones internas del cuerpo y los pensamientos, sin dejarse llevar por ellos. Los meditadores expertos exhiben una menor actividad de las áreas cerebrales relacionadas con la ansiedad, tales como la corteza insular y la amígdala.

Compasión y benevolencia

En esta práctica, el meditador cultiva un sentimiento de bondad hacia otras personas, ya sean amigos o enemigos. Las regiones del cerebro que se activan cuando nos ponemos en el lugar del otro (como la intersección temporoparietal) muestran una mayor actividad.



1 Mente distraída

En la imagen del cerebro de un meditador quedan resaltados el giro cingulado posterior, el precúneo y otras áreas que forman parte de la red neuronal por defecto, la cual se activa cuando los pensamientos comienzan a dispersarse.

2 Darse cuenta de la distracción

La red neuronal de asignación de relevancia (*salience network*), que comprende la ínsula anterior y el giro cingulado anterior, se activa cuando el meditador se da cuenta de la distracción. Al percatarse de que su mente ha divagado, el voluntario pulsa un botón para informar de ello a los investigadores.

3 Reorientación de la consciencia

Dos áreas cerebrales (la corteza prefrontal dorsolateral y el lóbulo parietal inferior), entre otras, ayudan a retirar la atención de la distracción y a redirigirla al ritmo de inhalaciones y exhalaciones.

4 Atención sostenida

La corteza prefrontal dorsolateral se mantiene activa cuando el meditador dirige su atención hacia la respiración durante largos períodos.

DAVID C. KILLPACK

funcionamiento y estructura física del cerebro. Los datos recopilados en esta investigación han comenzado a demostrar que la meditación reorganiza las conexiones de los circuitos cerebrales para producir efectos saludables no solo en la mente y el cerebro, sino en el organismo entero.

¿QUÉ ES LA MEDITACIÓN?

La meditación tiene raíces en las prácticas contemplativas de casi todas las religiones principales. Su difusión en los medios de comunicación ha dado varios significados al término. Nosotros nos referiremos a ella como el cultivo de cualidades humanas básicas, tales como lograr una mente más estable y clara, el equilibrio emocional, una sensación de benevolencia, e incluso de amor y compasión (cualidades que permanecen latentes si no se hace un esfuerzo por desarrollarlas). También constituye un proceso de familiarización con un modo de ser más sereno y flexible.

En principio, la meditación es bastante simple y puede realizarse en cualquier sitio. No hace falta ningún equipo ni vestimenta especial. El meditador comienza por adoptar una postura cómoda, ni muy tensa ni muy relajada, y por desear la autotransformación y el bienestar de los otros, así como el alivio de su sufrimiento. Más tarde, el practicante debe estabilizar su mente, que con frecuencia se halla alborotada y está ocupada en una incesante cháchara interna. El control de la mente requiere liberarla del condicionamiento automático y de la confusión interna.

Examinaremos aquí lo que sucede en el cerebro durante tres tipos comunes de meditación desarrolladas a través del budismo y ahora practicadas en programas seculares en hospitales y colegios de todo el mundo. La primera, la meditación mediante la atención focalizada, pretende controlar y centrar la mente en el momento presente, a la vez que desarrolla la capacidad de mantenerse alerta a las distracciones. La segunda, la de consciencia o atención plena (*mindfulness*), intenta cultivar un estado mental que responda de manera menos visceral a las emociones, pensamientos y sensaciones que tienen lugar en el momento presente, para evitar que caigan en una espiral sin control y creen angustia mental. El meditador se mantiene alerta en cada momento y ante cualquier experiencia, sin concentrarse en nada en concreto. Para terminar, otro tipo de práctica, conocida en la tradición budista como el cultivo de la compasión y la benevolencia, promueve una perspectiva altruista hacia los demás.

BAJO EL ESCÁNER

Hace poco se ha comenzado a averiguar lo que sucede dentro del cerebro durante varios tipos de meditación. Wendy Hasenkamp, a la sazón en la Universidad Emory, y sus colaboradores usaron técnicas de neuroimagen para identificar las redes cerebrales que se activaban en la atención focalizada. Durante la exploración, los participantes se concentraban en la sensación producida por la respiración. En esta forma de meditación, la mente suele desviarse de su objetivo; la persona debe reconocer que esto ocurre y restaurar entonces la atención al ritmo gradual de la inhalación y la exhalación. En el presente estudio, el meditador tenía que señalar la distracción mental apretando un botón. Se identificaron cuatro fases de un ciclo cognitivo: un episodio de distracción mental, un momento de toma de conciencia de la distracción, una fase de reorientación de la atención y una reanudación de la atención focalizada.

En cada una de una de las fases se hallan implicadas regiones cerebrales concretas. En la primera parte del ciclo, cuando se produce la distracción, aumenta la actividad de la extensa red neuronal por defecto. Esta incluye áreas de la corteza prefrontal medial, del giro cingulado posterior, del precúneo, del lóbulo parietal inferior y de la corteza temporal lateral. Se sabe que tal red se activa durante la distracción mental e interviene en la construcción y actualización de modelos internos del mundo basados en recuerdos a largo plazo acerca de uno mismo o de otros.

En la segunda fase, la toma de conciencia de una distracción, participan otras áreas del cerebro, como la ínsula anterior y el giro cingulado anterior, regiones de la llamada red neuronal de asignación de relevancia (*salience network*). Esta red regula los sentimientos percibidos de manera subjetiva, lo que puede llevar a distraerse durante una tarea. Parece estar involucrada en la identificación de sucesos novedosos y, durante la meditación, en el cambio de actividad de grupos de neuronas que constituyen redes de gran escala. De este modo, puede retirar la atención de la red neuronal por defecto.

En la tercera fase intervienen otras áreas, como la corteza prefrontal dorsolateral y el lóbulo parietal inferior lateral, que permiten recuperar la atención al desvincularla de cualquier estímulo que la distraiga. Finalmente, en la cuarta y última fase, mientras la atención del meditador sigue centrándose en un objeto como la respiración, la corteza prefrontal dorsolateral continúa conservando un alto nivel de actividad.

En nuestro laboratorio de Wisconsin observamos, además, diferentes patrones de actividad que dependían de la experiencia del practicante. Los meditadores veteranos con más de 10.000 horas de práctica mostraban una mayor actividad que los novatos en las regiones del cerebro relacionadas con la atención. Paradójicamente, los más experimentados mostraban una menor activación que otros sin tanta experiencia. Los meditadores avanzados parecen adquirir tal destreza que pueden alcanzar un estado centrado de la mente con menor esfuerzo. Estos efectos recuerdan la capacidad de los músicos y atletas expertos, quienes se sumergen en el flujo de sus actuaciones sin apenas control intencional (*effortful control*).

Para conocer el impacto de la meditación por atención focalizada, también estudiamos a voluntarios antes y después de un retiro de tres meses con ejercicios de meditación intensiva durante al menos ocho horas al día. Recibían auriculares que emitían sonidos a una determinada frecuencia, en ocasiones mezclados con otros ligeramente agudos. Debían concentrarse en los sonidos escuchados por un oído durante diez minutos y reaccionar a los tonos agudos espaciados periódicamente. Después del retiro, observamos que los meditadores mostraban una menor variabilidad en sus tiempos de reacción a esta tarea repetitiva, y que se prestaba a distracciones, en comparación con un grupo de control que no había meditado. El resultado indicaba que los meditadores habían aumentado su capacidad para mantenerse alerta. Y solo en ellos las respuestas eléctricas del cerebro a tonos agudos se mantenían más estables en la segunda sesión.

EL FLUJO DE LA CONSCIENCIA

El segundo tipo de meditación que ha sido ampliamente estudiado guarda relación con otra forma de atención: la consciencia plena [*véase* «La meditación de consciencia plena», por Christophe André; Mente y cerebro n.º 59, 2013]. En este caso el meditador debe reparar en cada imagen o sonido, a la vez que sigue las sensaciones físicas internas y su monólogo interior. La persona se mantiene consciente de lo que sucede sin preocuparse en exceso por ninguna percepción o pensamiento en particular, regresando a su objeto de atención cada vez que



MIENTRAS EL AUTOR Matthieu Ricard medita, su actividad cerebral es registrada en un encefalograma.

JEFF MILLER, UNIVERSIDAD DE WISCONSIN-MADISON

la mente se distrae. A medida que aumenta la consciencia de lo que está sucediendo alrededor, los factores irritantes rutinarios (un compañero de trabajo enfadado, un niño inquieto en casa) se vuelven menos perturbadores y se desarrolla una sensación de bienestar psicológico.

Con Heleen Slagter, por entonces en nuestro grupo de Wisconsin, tratamos de analizar la influencia de esta forma de entrenamiento en el funcionamiento mental. A tal fin, evualuamos la capacidad de los participantes para detectar estímulos visuales de corta duración (se trata de un medio para medir la meditación de consciencia plena, que en ocasiones también se llama consciencia no reactiva). Para llevar a cabo este experimento, los sujetos debían identificar dos números que aparecían brevemente en una pantalla en medio de una sucesión de letras. Si el segundo número se presenta unos 300 milisegundos después del primero, los sujetos a menudo no lo ven, un fenómeno conocido como «parpadeo atencional».

Si el segundo número se muestra después de 600 milisegundos, se identifica sin dificultad. El parpadeo atencional refleja los límites de la capacidad mental para procesar dos estímulos que se presentan muy seguidos. Cuando se dedica demasiada atención al procesamiento del primer número, el segundo no siempre puede ser identificado, aunque el observador suele reconocerlo en alguno de los ensayos. Conjeturamos que el entrenamiento de la consciencia plena podría reducir esta propensión a «quedarse atascado», o absorbido por la visión del primer número. En este tipo de meditación se cultiva una forma no reactiva de consciencia sensorial que debería dar lugar a una reducción del parpadeo atencional. Como predijimos, después de tres meses de retiro intensivo, los meditadores percibían ambos números con mayor frecuencia que el grupo de control. Esta percepción mejorada también se reflejaba en una menor actividad de cierto tipo de onda cerebral en respuesta al primer número. El seguimiento de la onda P3b, utilizado para evaluar la distribución de la atención, indicaba que los meditadores optimizaban la atención y lograban un parpadeo atencional mínimo.

Darse cuenta de una sensación desagradable puede reducir las respuestas emocionales inapropiadas y ayudar a dejar atrás el sentimiento negativo, lo que puede resultar especialmente útil en el tratamiento del dolor. En nuestro laboratorio de Wisconsin hemos evaluado a practicantes expertos mientras llevaban a cabo una forma avanzada de meditación de consciencia plena denominada presencia abierta o consciencia pura. Durante esta, la mente, calmada y relajada, no se concentra en nada en particular; se mantiene tranquila y clara, sin excitación ni aburrimiento. El meditador observa y está abierto a la experiencia sin intentar interpretar, cambiar, rechazar o ignorar sensaciones dolorosas. Hallamos que si bien la intensidad del dolor no disminuía en los meditadores, este les resultaba menos molesto que al grupo de control.

Comparados con los principiantes, la actividad cerebral de los meditadores expertos menguaba en las regiones relacionadas con la ansiedad (la corteza insular y la amígdala) en el período previo al estímulo doloroso. Tras exposiciones repetidas a este tipo de estímulos, la repuesta del cerebro en las regiones relacionadas con el dolor se habituaba a ellos más pronto, en comparación con los novatos. Otros ensayos de nuestro laboratorio han demostrado que la práctica de la meditación aumenta la capacidad para controlar y amortiguar respuestas fisiológicas básicas (inflamación o niveles de una hormona de estrés) ante tareas que resultan socialmente estresantes, como dar un discurso en público o hacer cálculo mental delante de un jurado severo.

Varios estudios han documentado los beneficios de la meditación de consciencia plena en síntomas de ansiedad y depresión, así como su aptitud para mejorar los patrones de sueño. Cuando se sienten tristes o preocupados, los pacientes con depresión pueden seguir y observar de forma deliberada los pensamientos y emociones negativos; pueden usar la meditación para controlarlos a medida que surgen de manera espontánea, y de este modo disminuir la obsesión que producen. Los psicólogos clínicos John Teasdale, a la sazón en la Universidad de Cambridge, y Zindel Segal, en la de Toronto, describieron en 2000 el efecto de la meditación de consciencia plena; en los pacientes que habían sufrido al menos tres episodios de depresión, la práctica de esta durante seis meses, junto con la terapia cognitiva, reducía el riesgo de recaída casi un 40 por cierto un año después del inicio de una depresión grave. En tiempo más reciente, Segal ha revelado que la intervención es superior al placebo y que ejerce un efecto protector contra la recidiva equiparable al de la terapia antidepresiva estándar de mantenimiento.

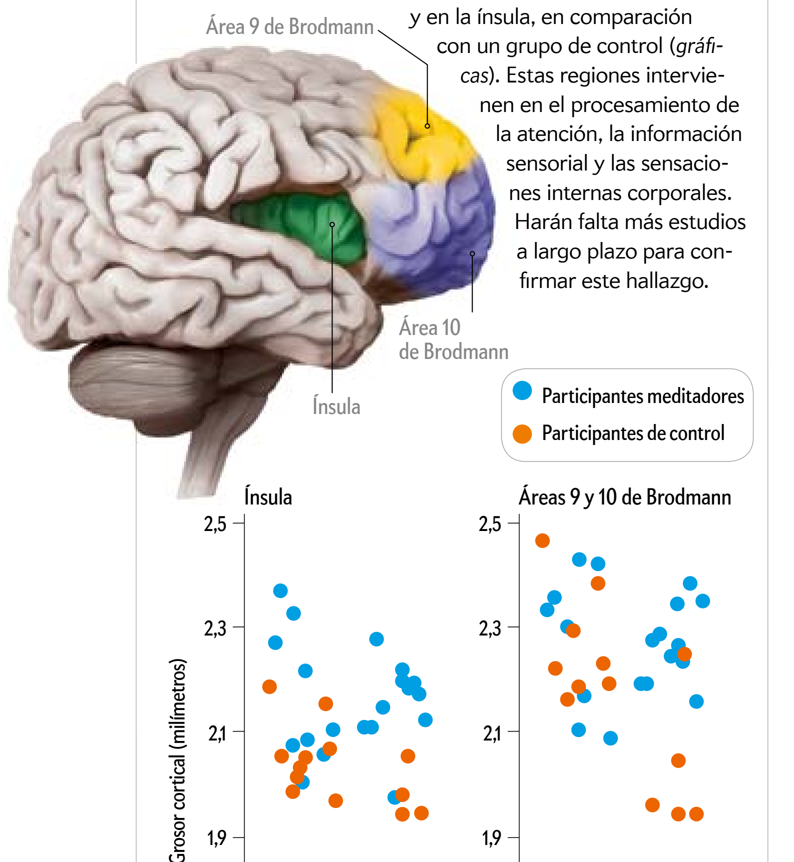
COMPASIÓN Y BENEVOLENCIA

La tercera forma de meditación estudiada consiste en cultivar actitudes y sentimientos de bondad y compasión hacia los de-

EFECTOS DE LA MEDITACIÓN

El cerebro crece

Investigadores de varias universidades exploraron los posibles cambios estructurales en el tejido cerebral causados por la meditación. Mediante el uso de resonancia magnética funcional, hallaron que veinte practicantes expertos en un tipo de meditación budista presentaban un mayor volumen de tejido cerebral en la corteza prefrontal (áreas 9 y 10 de Brodmann) y en la ínsula, en comparación con un grupo de control (*gráficas*). Estas regiones intervienen en el procesamiento de la atención, la información sensorial y las sensaciones internas corporales. Harán falta más estudios a largo plazo para confirmar este hallazgo.



FUENTE: «MEDITATION EXPERIENCE IS ASSOCIATED WITH INCREASED CORTICAL THICKNESS», POR SARA W. LAZAR ET AL., EN *NEUROREPORT*, VOL. 16, N.º 17; 28 DE NOVIEMBRE DE 2005

más, ya sean familiares cercanos, extraños o enemigos. Esta práctica conlleva darse cuenta de las necesidades de otras personas y experimentar un deseo sincero y fraternal de ayudarlas o de aliviar su sufrimiento protegiéndolas de su propio comportamiento destructivo.

Para generar un estado de compasión, el meditador debe a veces imaginar lo que la otra persona está sintiendo. Pero empatizar con los sentimientos de otros no es por sí mismo suficiente para lograr un estado mental de compasión. La meditación también debe estar guiada por un deseo altruista de ayudar a alguien que está sufriendo. Esta forma de meditación basada en el amor y la compasión ha demostrado ser algo más que un ejercicio espiritual. Se ha comprobado que puede beneficiar el estado de salud de trabajadores, profesores y otras personas con riesgo de fatiga emocional a causa de la profunda empatía que experimentan con las dificultades de otros.

El meditador comienza por cultivar un sentimiento incondicional de benevolencia y amor hacia los demás, acompañado de una frase que se repite en silencio e intenta transmitir, como «que todos los seres hallen la felicidad y las causas que llevan a ella; y que se libren del sufrimiento y de las causas que lo provocan». En 2008 estudiamos a voluntarios que habían practicado esta forma de entrenamiento durante miles de horas y observamos una mayor actividad en varias de sus regiones cerebrales cuando escuchaban voces que generaban angustia. Las cortezas somatosensorial e insular, conocidas por participar en respuestas de empatía y otras emociones, se hallaban más activadas en los expertos, en comparación con los sujetos de control, lo que indicaba que tenían una mayor capacidad para compartir los sentimientos de los otros sin mostrar ningún signo de sentirse abrumados. La práctica de la meditación compasiva también produce más actividad en áreas como la intersección temporoparietal, la corteza prefrontal medial y el surco temporal superior, regiones que suelen estimularse cuando nos ponemos en el lugar del otro.

En tiempo más reciente, Tania Singer y Olga Klimecki, ambas en el Instituto Max Planck de Ciencias de la Cognición y del Cerebro en Leipzig, en colaboración con uno de los autores (Ricard), intentaron distinguir los efectos de la empatía y la compasión en los meditadores. Se dieron cuenta de que la compasión y el amor altruista estaban asociados a emociones positivas, y sugirieron que el agotamiento emocional o desgaste era, de hecho, una especie de «fatiga» de la empatía.

De acuerdo con la tradición contemplativa budista de la cual deriva esta práctica, la compasión, lejos de llevar a la angustia o al desánimo, refuerza el equilibrio interno, la fortaleza mental y la determinación para ayudar a los que sufren. Para un niño que está hospitalizado, una madre amorosa que le tiende la mano y le reconforta con palabras tiernas sin duda le beneficiará más que si esta sufre angustia empática e, incapaz de soportar la visión de su hijo enfermo, no cesa de recorrer el pasillo de un lado a otro. En el segundo caso, la madre puede terminar padeciendo desgaste emocional, el cual, según un estudio estadounidense, afectó al 60 por ciento de 600 cuidadores observados.

Para seguir explorando los mecanismos de la empatía y la compasión, Klimecki y Singer dividieron en dos grupos a 60 voluntarios sin experiencia en la meditación. A unos se les entrenó para la meditación centrada en el amor y la compasión; a los otros, para el cultivo de sentimientos de empatía hacia los demás. Los resultados preliminares mostraron que, tras una semana de entrenamiento, el primer grupo observaba vídeos de gente sufriendo con sentimientos más positivos y benevolentes. En cambio, el segundo experimentaba emociones de una reacción profunda ante el sufrimiento ajeno. Esas emociones también conllevaban sentimientos y pensamientos negativos, por lo que este grupo sufría más angustia, hasta el punto de no poder controlar sus emociones.

Conscientes de tales efectos desestabilizadores, Singer y Klimecki introdujeron en el segundo grupo la enseñanza de la meditación basada en la compasión y benevolencia. Observaron entonces que este ejercicio adicional contrarrestaba los efectos nocivos del entrenamiento exclusivo en la empatía: las emociones negativas disminuían y aumentaban las positivas. Además de estos resultados, se observaron cambios en las áreas de varias redes cerebrales asociadas con la compasión, las emociones positivas y el amor materno, entre ellas la corteza orbitofrontal, el estriado ventral y el giro cingulado anterior. Asimismo, los

investigadores demostraron que una semana de entrenamiento en la meditación compasiva aumentaba el comportamiento prosocial, según se desprendió de un juego virtual que se desarrolló para medir la capacidad de ayudar a los demás.

UNA PUERTA A LA CONSCIENCIA

La meditación explora la naturaleza de la mente, lo que permite estudiar la consciencia y los estados mentales subjetivos desde el punto de vista del meditador. En colaboración con meditadores budistas expertos, hemos estudiado en Wisconsin la actividad eléctrica del cerebro. Hemos obtenido electroencefalogramas (EEG) durante la meditación por compasión, en la que los meditadores describen que la consciencia de uno mismo se vuelve menos fija y permanente.

Descubrimos que los meditadores expertos podían mantener a voluntad un patrón particular de EEG. En concreto, las llamadas ondas gamma de alta amplitud entre 25 y 42 hercios. La coordinación de las oscilaciones cerebrales podría desempeñar un papel crucial en la construcción de redes neurales temporales que integren las funciones cognitivas y afectivas durante el aprendizaje y la percepción consciente, proceso que puede conllevar cambios duraderos en los circuitos del cerebro.

Las oscilaciones de gran amplitud persistían varias docenas de segundos durante la meditación y aumentaban a medida que se avanzaba en la práctica. Los EEG diferían de los correspondientes a los sujetos de control, en especial en la corteza frontoparietal lateral. Los cambios en la actividad eléctrica de los meditadores expertos pueden reflejar una mayor consciencia sobre su entorno y sobre sus procesos mentales internos, aunque se necesita profundizar en el funcionamiento de las ondas gamma.

La meditación provoca modificaciones no solo en determinados procesos cognitivos y emocionales, sino también en el volumen de ciertas áreas del cerebro, lo que tal vez refleje alteraciones en el número de conexiones entre neuronas. Un estudio preliminar de Sara W. Lazar, de la Universidad Harvard, y sus colaboradores muestra que en los meditadores expertos el volumen del tejido más oscuro del cerebro (la materia gris) es diferente al de los individuos de control; en concreto, el de la ínsula y las cortezas prefrontales (en las áreas 9 y 10 de Brodmann, que suelen activarse durante varias formas de meditación). Estas diferencias resultaban más evidentes en los participantes de mayor edad, lo que sugiere que la meditación podría modificar la pérdida de espesor del tejido cerebral asociada a la edad.

En un segundo estudio, Lazar y sus colaboradores descubrieron que la práctica de la consciencia plena disminuía también el volumen de la amígdala (región implicada en el procesamiento del miedo) en aquellos sujetos en quienes se redujo más el estrés durante el transcurso del entrenamiento. Además, Eileen Luder, de la Universidad de California en Los Ángeles, y sus colaboradores observaron que los meditadores exhibían diferencias en los axones, las fibras que conectan distintas regiones del cerebro entre sí. Tal dato apoya la hipótesis de que la meditación sí produce cambios estructurales en este órgano. Una importante limitación de esta investigación es la falta de estudios longitudinales a largo plazo que sigan a un grupo durante varios años, así como la ausencia de comparaciones entre meditadores y no meditadores de ambientes y edades similares.

Ya existen algunos indicios de que la meditación (y su capacidad para aumentar el bienestar general) puede mitigar la inflamación y otros tipos de estrés biológico que se producen a escala molecular. Un estudio colaborativo entre nuestro grupo y el liderado por Perla Kaliman, del Instituto de Investigación Biomédica de Barcelona, demostró que, en los meditadores experimentados, un día de práctica intensiva de consciencia plena disminuía la actividad de genes relacionados con la inflamación y modificaba el funcionamiento de las enzimas implicadas en la activación y desactivación de genes. Un estudio de Cliff Saron, de la Universidad de California en Davis, reveló el efecto de la meditación en una molécula implicada en la regulación de la longevidad celular. La molécula en cuestión era una enzima llamada telomerasa, que alarga los segmentos de ADN en los extremos de los cromosomas. Estos segmentos, los telómeros, aseguran la estabilidad del material genético durante la división celular. Se acortan cada vez que la célula se divide, y cuando su longitud disminuye por debajo de un umbral crítico, la célula deja de dividirse y entra gradualmente en un estado de senescencia. En comparación con el grupo de control, los meditadores que mostraron reducciones más pronunciadas del estrés fisiológico también presentaron una mayor actividad de la telomerasa al final del retiro. Tal descubrimiento sugiere que el ejercicio de la consciencia plena podría ralentizar los procesos de envejecimiento celular en algunos de sus practicantes.

UN CAMINO HACIA EL BIENESTAR

Cerca de quince años de investigaciones han hecho algo más que demostrar los cambios que produce la meditación en la función y estructura del cerebro de los practicantes expertos. Los datos empiezan ahora a demostrar que las prácticas contemplativas pueden tener un impacto notable en procesos biológicos críticos para la salud física.

Se necesitan más estudios, basados en ensayos comparativos, aleatorizados y bien definidos, que permitan aislar los efectos relacionados con la meditación de otros factores psicológicos que puedan influir en los resultados. Otros parámetros que pueden hacer variar los datos son la motivación del practicante y el papel desempeñado por profesores y estudiantes en un grupo de meditación. Hace falta más trabajo para comprender los posibles efectos secundarios negativos de la meditación, la duración más conveniente de una determinada sesión y el modo de adaptarla a las necesidades de cada persona.

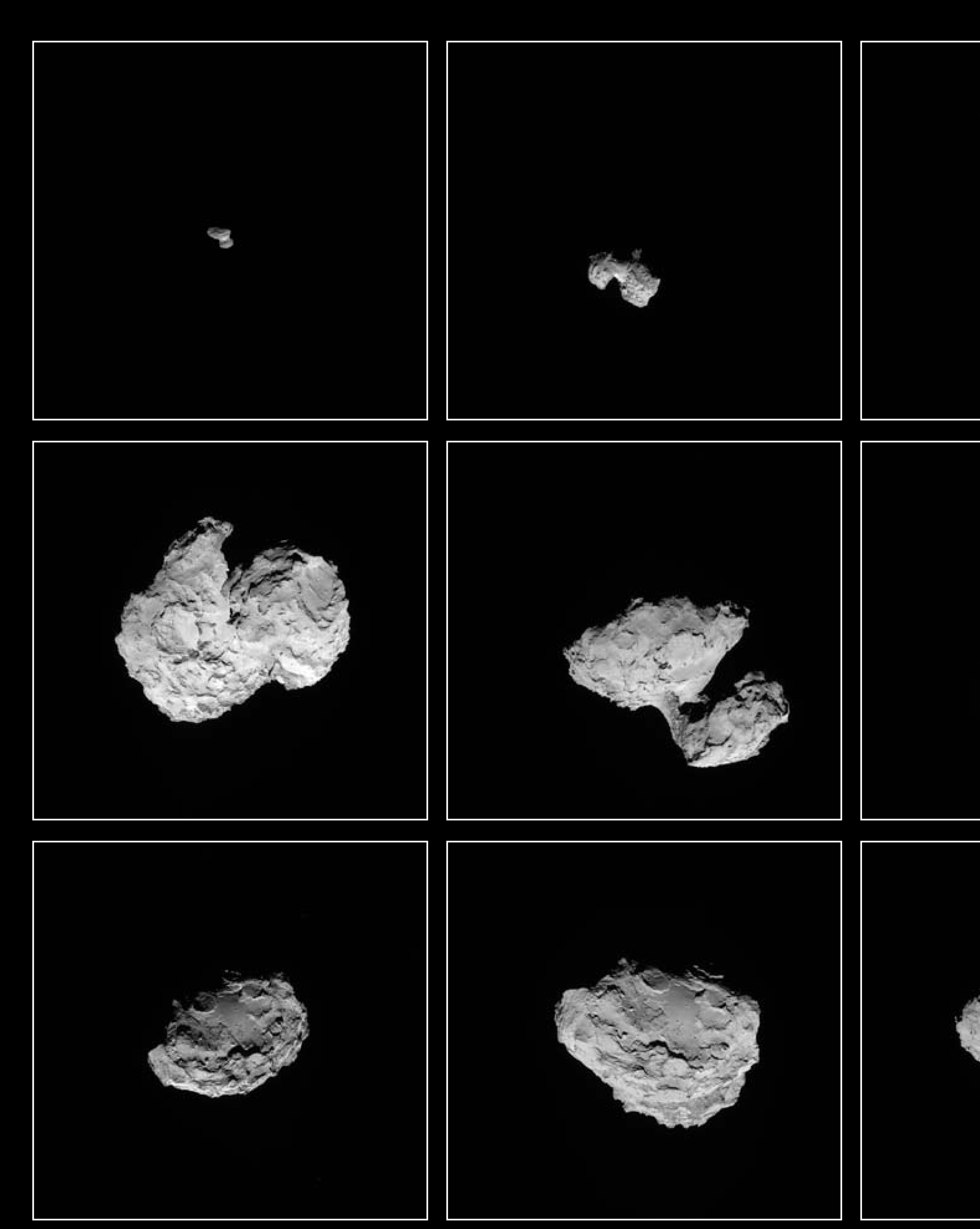
Incluso con las necesarias precauciones, la investigación sobre la meditación aporta nuevas interpretaciones sobre los métodos de entrenamiento mental que podrían mejorar la salud y el bienestar humanos. Por otro lado, la capacidad de cultivar la compasión y otras cualidades humanas positivas sienta los cimientos de un marco ético desvinculado de cualquier filosofía o religión, lo que podría tener un efecto profundamente beneficioso en todos los aspectos de las sociedades humanas.

PARA SABER MÁS

The physiology of meditation. Robert Keith Wallace y Herbert Benson en *Scientific American*, vol. 226, págs. 84-90, febrero de 1972.
Happiness: A guide to developing life's most important skill. Matthieu Ricard. Little, Brown and Company, 2006.
Mental training enhances attentional stability: Neural and behavioral evidence. Antoine Lutz et al. en *Journal of Neuroscience*, vol. 29, n.º 42, págs. 13.418-13.427, octubre de 2009.
Mind wandering and attention during focused meditation: A fine-grained temporal analysis of fluctuating cognitive states. Wendy Hasenkamp et al. en *NeuroImage*, vol. 59, n.º 1, págs. 750-760, enero de 2012.

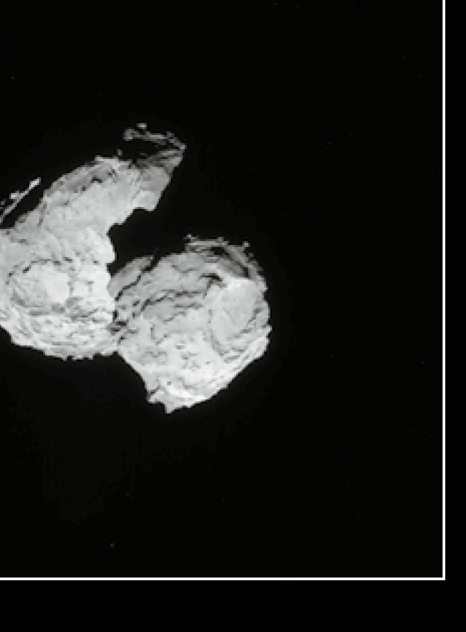
EN NUESTRO ARCHIVO

La meditación refuerza la mente. D. Vaitl en *MyC* n.º 55, 2012.
Efectos cerebrales de la meditación. C. Koch en *MyC* n.º 68, 2014.



CADA VEZ MÁS CERCA: A medida que se aproximaba al cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, la nave espacial *Rosetta* fue captando imágenes más detalladas.





ESPACIO

El sistema solar más allá de Neptuno

Las sondas *Rosetta* y *New Horizons* explorarán por primera vez los cometas, asteroides y planetas enanos que componen el lejano cinturón de Kuiper. Sus resultados arrojarán luz sobre la formación del sistema solar

Michael D. Lemonick



Michael D. Lemonick escribe para el portal de noticias sin ánimo de lucro *Climate Central*. Es autor de *Mirror Earth: The search for our planet's twin* (Walker Books, 2012). Ha trabajado durante 21 años como redactor científico para la revista *Time*.

El 20 de enero de 2014 sería un día excelente o nefasto para los hombres y mujeres responsables de la sonda espacial *Rosetta*. Hacía casi diez años que la Agencia Espacial Europea (ESA) había enviado la nave, de tres toneladas, hacia el cometa de engorroso nombre 67P/Churyumov-Gerasimenko (o 67P, para abreviar). El encuentro debía producirse en agosto. Si todo se desarrollaba según lo planeado, la misión lograría algo que nunca nadie había intentado con anterioridad: insertarse en órbita alrededor de un cometa y liberar un módulo aterrizador para que se posase sobre su superficie.

Pero, para que eso sucediera, *Rosetta* tenía antes que despertarse. Hacía más de dos años que había entrado en estado de hibernación para conservar energía. Su vuelta a la vida había sido programada para el 20 de enero a las 11:00 de la mañana, hora central europea. Los científicos e ingenieros que esperaban en la sala de control del Centro Europeo de Operaciones Espaciales, en Darmstadt, confiaban en que todo iría bien. Pero también tenían presente lo ocurrido en 1993 con la sonda de la NASA *Mars Observer*, que perdió el contacto por radio y desapareció sin dejar rastro. Durante unos minutos, pareció como si algo así pudiera volver a suceder.

«Vi muchas caras pálidas en la sala», recuerda Holger Sierks, miembro del Instituto Max Planck para la Investigación del Sistema Solar en Gotinga y responsable de las cámaras ópticas e infrarrojas de la nave. Tras quince minutos que duraron una eternidad, en Darmstadt se oyó un tintín electrónico. Era el aviso de llegada de una señal enviada desde más allá de Júpiter. «El alivio fue enorme», reconoce Sierks.

En las semanas posteriores quedó claro que *Rosetta* no solo se había despertado, sino que funcionaba a la perfección. La misión daría respuesta a preguntas clave sobre la estructura, composición y origen de los cometas, cuerpos helados que apenas han sufrido alteraciones desde la formación del sistema solar, hace 4600 millones de años. El pasado mes de noviembre, la sonda liberó su módulo de aterrizaje, *Philae*. Las perforaciones que el ingenio ya ha comenzado a llevar a cabo en la superficie del astro aportarán algunas pistas clave sobre la historia del sistema solar.

Rosetta no está sola ahí fuera. En julio de 2015, tras un viaje de nueve años, la sonda de la NASA *New Horizons* llevará a cabo otro hito histórico al sobrevolar Plutón y sus cinco satélites conocidos. «La nave se encuentra en un estado espectacular», asegura Alan Stern, investigador principal del proyecto y miembro del Instituto de Investigación del Sudoeste en Boulder. Aunque se trata de dos misiones independientes, existe una relación entre ellas. Tanto Plutón como 67P pertenecen al cinturón de Kuiper, un vasto e inexplorado enjambre de miles de millones de objetos que orbitan más allá de Neptuno y cuyos diámetros abarcan desde unos pocos metros hasta más de 2000 kilómetros.

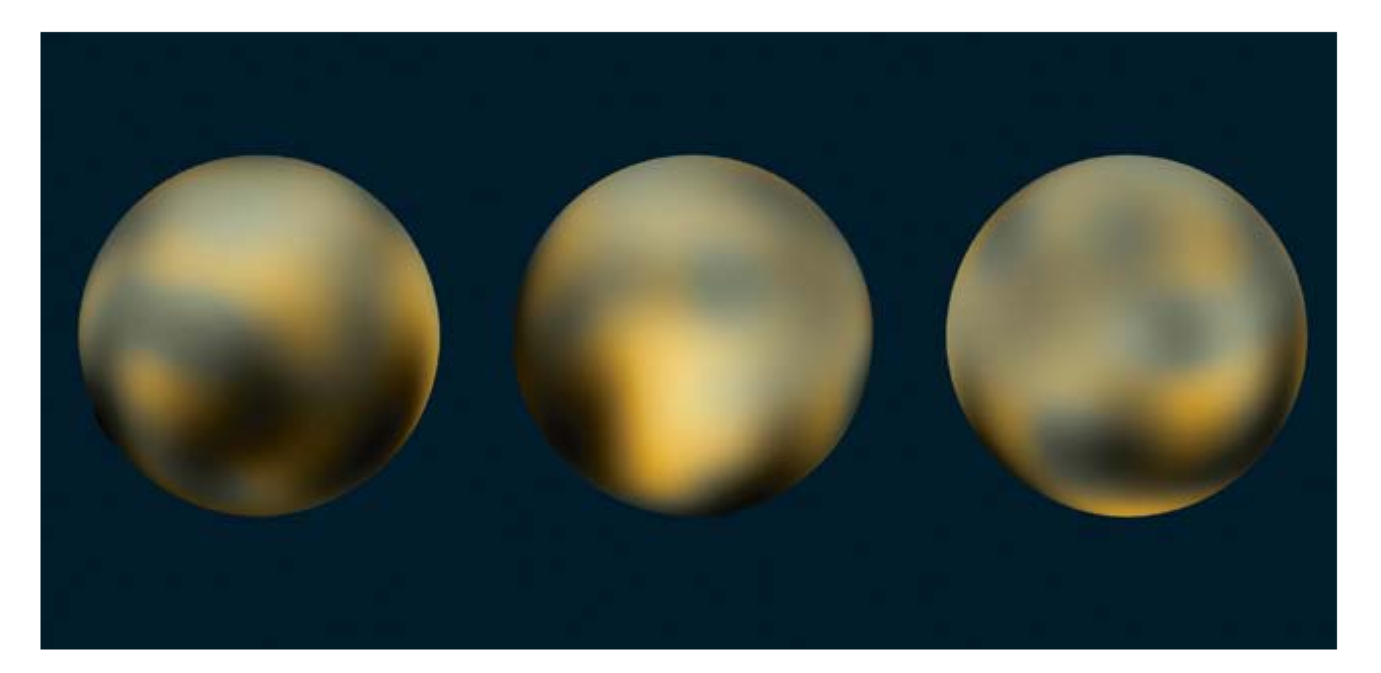
Ambas misiones culminarán dos décadas de descubrimientos que, según Stern, han obligado a los astrónomos a reescribir todo lo que creían saber sobre la arquitectura del sistema solar. De hecho, hace apenas veinte años la existencia del cinturón de Kuiper ni siquiera se conocía. Desde entonces se han descubierto varios mundos congelados cuyo tamaño rivaliza con el de Plutón. Hay indicios que apuntan a que en tiempos remotos tuvo lugar una violenta reestructuración de las órbitas de Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, y quizás a la existencia de un quinto planeta gigante desaparecido. A fin de entender cómo se formó el cinturón, los expertos han analizado el tamaño y la órbita de los aproximadamente 1500 objetos conocidos en esa zona del sistema solar exterior. Y se han llegado a preguntar si, en el pasado, los fragmentos de hielo procedentes del cinturón de Kuiper pudieron traer agua a una Tierra joven y seca.

EN SÍNTESIS

El cinturón de Kuiper se compone de miles de millones de objetos helados que orbitan más allá de Neptuno. Se trata de ejemplares que han permanecido casi vírgenes desde los orígenes del sistema solar.

Dos misiones espaciales explorarán por fin los secretos del cinturón. *Rosetta* orbita ya alrededor del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. *New Horizons* llegará a Plutón este verano.

Gracias al estudio de esos objetos, los científicos planetarios podrán disponer por primera vez de datos clave sobre la arquitectura y el proceso de formación del sistema solar.



BORROSO: Esta imagen de Plutón tomada por el telescopio espacial Hubble muestra notables variaciones en su superficie, entre las que destaca una misteriosa mancha brillante (*centro*). El próximo verano, la sonda espacial *New Horizons* estudiará de cerca el planeta enano.

CORTESÍA DE LA NASA, LA ESA Y M. BUIE, INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DEL SUDOESTE

Cada una de esas investigaciones ha abierto una pequeña ventana al origen y la evolución del cinturón de Kuiper. Y, al igual que en la parábola de los ciegos y el elefante, ha comenzado a emerger una visión más completa sobre su estructura, composición y evolución. Ahora que dos misiones podrán por fin estudiar de cerca objetos del cinturón muy diferentes entre sí, el panorama promete clarificarse de forma drástica.

HISTORIA DE UNA ANTIPREDICCIÓN

En 1930, cuando el joven astrónomo Clyde Tombaugh avistó un nuevo objeto más allá de Neptuno, ni él ni la comunidad científica pusieron en duda que se trataba del Planeta X: el conjeturado noveno planeta del sistema solar, cuya existencia se sospechaba desde hacía tiempo. En un principio se calculó que el nuevo objeto (bautizado «Plutón» por sugerencia de una niña británica de once años llamada Venetia Burney) tendría una masa similar a la de la Tierra. Sin embargo, hacia los años setenta estaba claro que Plutón era menor que la Luna, y su masa, muy inferior a la de nuestro satélite. En realidad, lo que Tombaugh había descubierto era el astro más brillante del cinturón de Kuiper.

Hasta los años ochenta, sin embargo, nadie se percató de la existencia del cinturón. Entre quienes pasaron por alto su presencia se cuenta Gerard Kuiper, el astrónomo de origen neerlandés al que el conjunto de astros debe su nombre. En los años cincuenta, Kuiper propuso que la región situada más allá de Neptuno pudo haber albergado en tiempos remotos todo tipo de objetos helados, pero pensaba que la gravedad del «masivo» Plutón los habría dispersado hacia el espacio profundo. Para él, esa zona del sistema solar debía estar vacía en su mayor parte. «Fue una verdadera antipredicción», señala David C. Jewitt, astrónomo de la Universidad de California en Los Ángeles ampliamente reconocido por sus observaciones pioneras del sistema solar exterior.

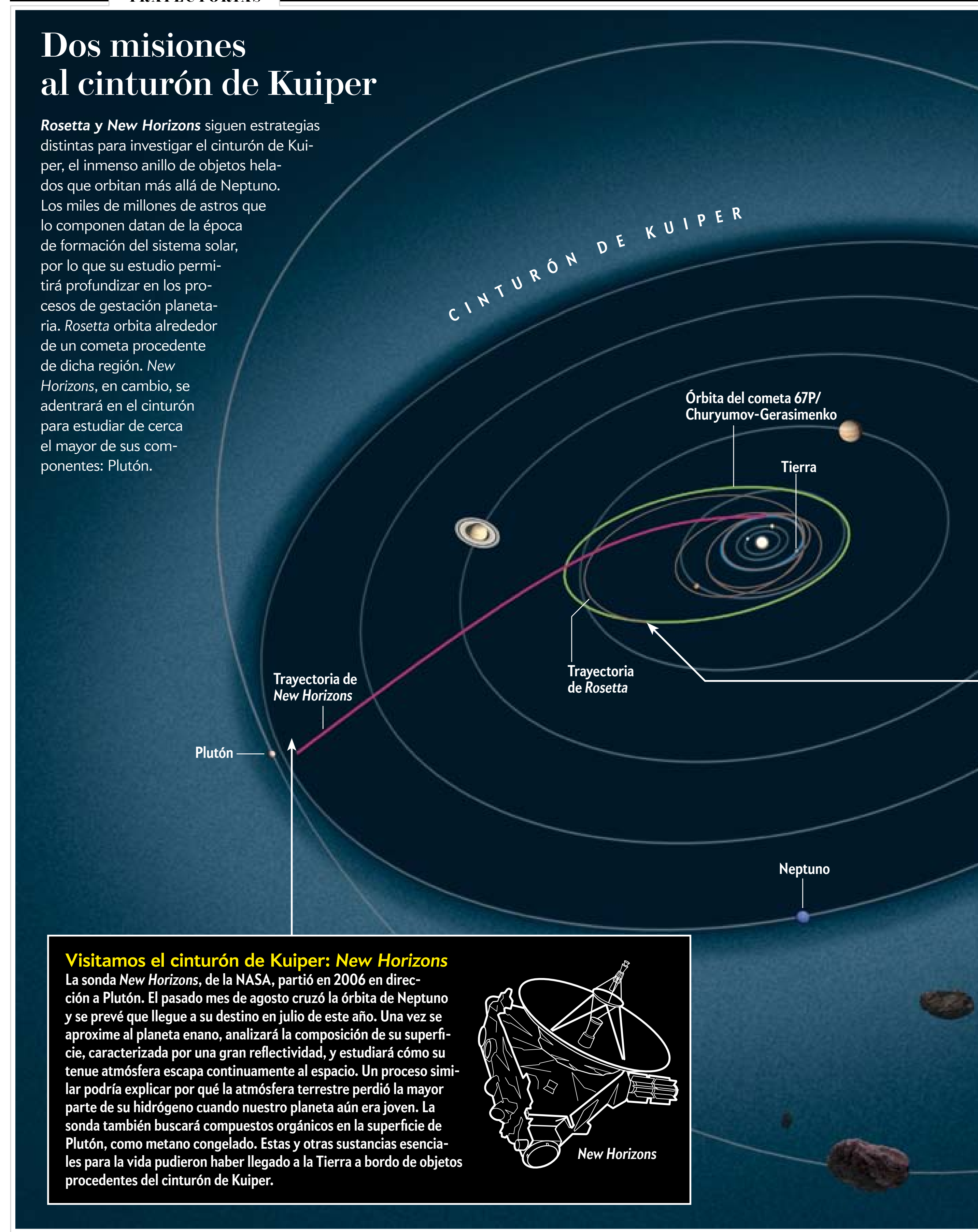
Hacia la misma época, Jan Oort, compatriota de Kuiper, postuló que esos objetos dispersados habrían acabado formando una nube esférica de protocometas que orbitarían a más de un año luz de distancia. Sugirió que, de tanto en tanto, uno de ellos caería hacia el sistema solar interior, donde se observaría en forma de cometa. Aquella hipótesis explicaba a la perfección por qué había cometas de período largo, procedentes de todas las direcciones y cuyas órbitas tardaban al menos 200 años en completarse.

Sin embargo, el postulado de Oort no daba cabida a los cometas de período más corto, cuyas órbitas tienden a alinearse con el plano relativamente uniforme en el que residen los planetas. El neerlandés concluyó que se trataba de cometas de período largo que habían sido desviados hacia órbitas menores por efecto de los planetas gigantes. Por entonces, nadie tuvo una idea mejor. O, mejor dicho, casi nadie: en los años cuarenta, el astrónomo irlandés Kenneth Edgeworth había sugerido que los cometas de período corto tal vez procediesen de una multitud de pequeños cuerpos mucho más próximos. No obstante, Edgeworth nunca llegó a con concretar su hipótesis. Michael E. Brown, el astrónomo del Instituto de Tecnología de California que en 2005 descubrió Eris (el objeto del tamaño de Plutón que acabó provocando que este perdiese su categoría de planeta un año después), no cree que la idea de Edgeworth pueda calificarse en modo alguno de predicción. Y, sea como fuere, en su época nadie se la tomó en serio.

Hoy, la mayoría de los científicos planetarios coinciden en que la primera predicción legítima de la existencia del cinturón de Kuiper se debe al astrónomo uruguayo Julio Fernández, ahora en la Universidad de la República del país rioplatense. Su trabajo de 1980 «On the existence of a comet belt beyond Neptune» («Sobre la existencia de un cinturón de cometas más allá de Neptuno») retomaba la propuesta de Edgeworth, pero lo hizo con detalles mucho más meticulosos. En 1988, Scott Tremaine, por entonces en la Universidad de Toronto, y sus compañeros Martin Duncan y Thomas Quinn demostraron que la multitud de cuerpos predichos por Fernández explicaría la frecuencia y las trayectorias de los cometas de período corto. Ellos fueron los

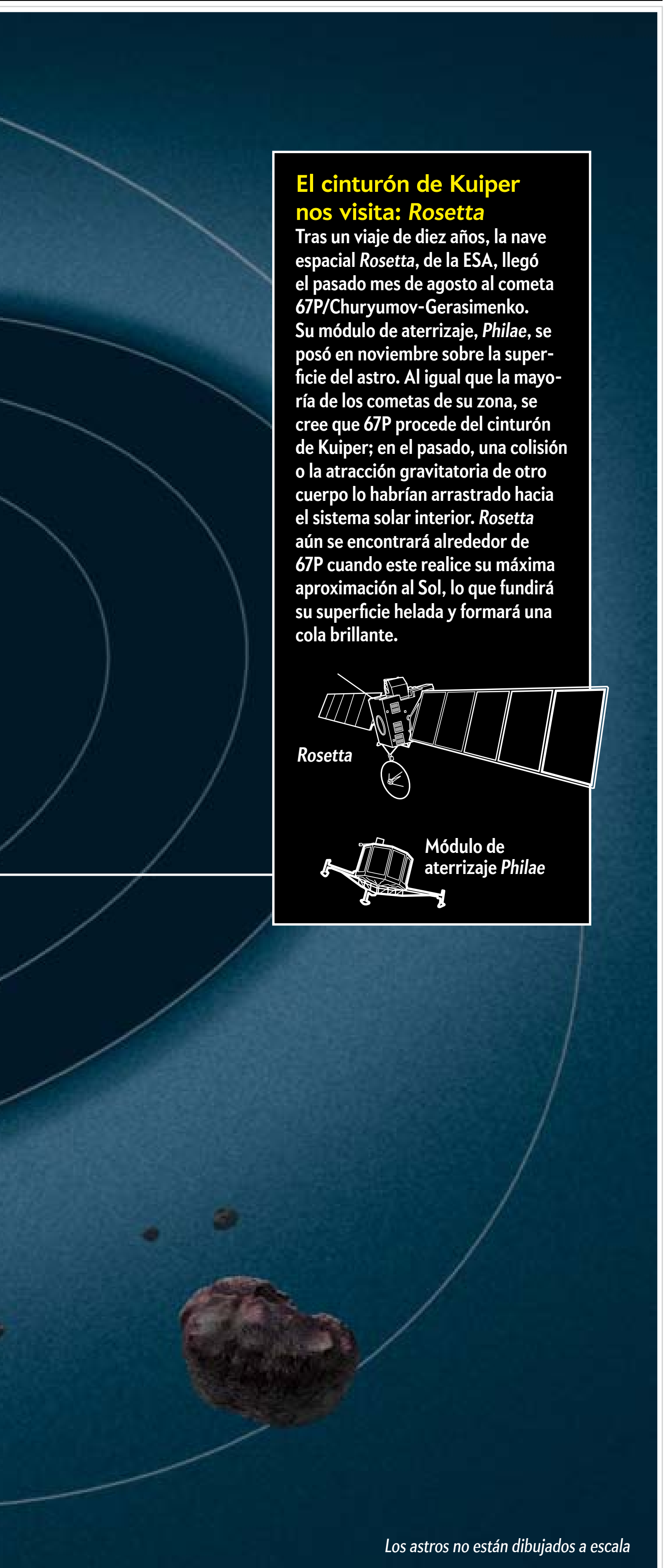
Dos misiones al cinturón de Kuiper

Rosetta* y *New Horizons siguen estrategias distintas para investigar el cinturón de Kuiper, el inmenso anillo de objetos helados que orbitan más allá de Neptuno. Los miles de millones de astros que lo componen datan de la época de formación del sistema solar, por lo que su estudio permitirá profundizar en los procesos de gestación planetaria. *Rosetta* orbita alrededor de un cometa procedente de dicha región. *New Horizons*, en cambio, se adentrará en el cinturón para estudiar de cerca el mayor de sus componentes: Plutón.



Visitamos el cinturón de Kuiper: *New Horizons*

La sonda *New Horizons*, de la NASA, partió en 2006 en dirección a Plutón. El pasado mes de agosto cruzó la órbita de Neptuno y se prevé que llegue a su destino en julio de este año. Una vez se aproxime al planeta enano, analizará la composición de su superficie, caracterizada por una gran reflectividad, y estudiará cómo su tenue atmósfera escapa continuamente al espacio. Un proceso similar podría explicar por qué la atmósfera terrestre perdió la mayor parte de su hidrógeno cuando nuestro planeta aún era joven. La sonda también buscará compuestos orgánicos en la superficie de Plutón, como metano congelado. Estas y otras sustancias esenciales para la vida pudieron haber llegado a la Tierra a bordo de objetos procedentes del cinturón de Kuiper.



ILUSTRACIONES DE DON DIXON (*sistema solar*) Y GEORGE RETSECK (*naves*)

primeros en emplear el término «cinturón de Kuiper»; aunque, como reconoce Tremaine, hoy en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, probablemente se trate de una atribución injusta: «En realidad debimos haberlo nombrado en honor a Fernández», admite.

Mientras Tremaine, Duncan y Quinn profundizaban en los aspectos teóricos del hipotético cinturón, Jewitt y Jane X. Luu, por entonces estudiante suya en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), ya habían comenzado a buscar pruebas empíricas. Su trabajo no estuvo motivado por consideraciones teóricas. De hecho, Jewitt y Luu desconocían el trabajo de Fernández y habían iniciado sus observaciones en 1986, dos años antes de que Tremaine y sus colaboradores publicaran sus resultados. «Simplemente, nos parecía muy extraño que el sistema solar exterior estuviera tan vacío», recuerda Jewitt.

Y, de hecho, no lo estaba. En agosto de 1992, usando un telescopio de 2,2 metros en la cima del extinto volcán Mauna Kea, en Hawái, Jewitt y Luu avistaron 1992 QB1, el primer objeto conocido del cinturón de Kuiper. Unos seis meses después descubrieron el segundo, lo que espabiló a otros miembros de la comunidad astronómica, recuerda Jewitt. Hoy se conocen unos 1500 objetos del cinturón de Kuiper (OCK). A partir de los datos disponibles, los astrónomos calculan que el cinturón debería albergar unos 100.000 objetos de más de 100 kilómetros de diámetro y hasta 10.000 millones mayores de 2 kilómetros. «Por cada asteroide del cinturón principal de asteroides hay 1000 objetos en el cinturón de Kuiper. Lo encuentro asombroso», señala Jewitt.

Para muchos, sin embargo, lo realmente impactante es lo que *no hay* en el cinturón de Kuiper. Según los mejores modelos de formación planetaria, esa gran estructura debería albergar objetos tan grandes como la Tierra e incluso mayores. Pero, si bien se han observado varios astros cuyas dimensiones rivalizan con las de Plutón (como Makemake, Haumea, Quaoar o Eris), aún no se ha descubierto ninguno de tamaño planetario. «Hay un número enorme de cuerpos ahí fuera, pero solo suman una décima parte de la masa de la Tierra», explica Jewitt.

Algo debió suceder durante los primeros estadios de formación del sistema solar para que los mayores objetos del cinturón de Kuiper desapareciesen. Los científicos planetarios llevan años debatiendo sobre el tema. Ahora, *Rosetta* y *New Horizons* deberían comenzar a aportar algunas pistas.

REESTRUCTURACIÓN PLANETARIA

Cuando se descubrió el cinturón de Kuiper, los físicos ya tenían una idea clara de los procesos que condujeron a la formación del sistema solar. Todo comenzó con una enorme nube interestelar de gas y polvo, que, por efecto de la gravedad, dio lugar a un disco en rotación. En su centro, la materia se arremolinó hasta formar una aglomeración tan densa y caliente que se desencadenaron reacciones termonucleares. Así nació el Sol.

El calor y la radiación del Sol impulsaron la mayoría del gas y parte del polvo hacia el exterior. Más cerca, el polvo se solidificó en guijarros, luego en bloques y después en planetesimales, cuerpos del tamaño de un asteroide que acabarían dando lugar a los planetas. Durante las últimas etapas del proceso, cientos de objetos del tamaño de Marte se habrían despedazado y vuelto a colisionar entre sí hasta engendrar los ocho planetas que conocemos hoy: no solo los interiores, sino también Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, que vienen a ser cuerpos rocosos cuya gran masa atrae hacía sí enormes cantidades de gas.

Con los pies sobre nuestro pasado

La misión Rosetta revela los secretos del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko

JOSEP M. TRIGO RODRÍGUEZ

La sonda interplanetaria *Rosetta* lleva desde agosto de 2014 orbitando alrededor del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, destino que alcanzó tras un viaje interplanetario de diez años en el que también visitó los asteroides Steins y Lutetia. Los primeros resultados de la misión revisten ya una enorme trascendencia científica. A la espera de completarse, su éxito podría igualar o incluso superar al logrado en su día por la sonda *Stardust*, de la NASA, que en 2006 trajo a la Tierra partículas del cometa 81P/Wild 2. Aquellos fueron los primeros materiales procedentes de un astro distinto a la Luna que llegaron a nuestro planeta a bordo de una nave espacial.

Debido a su pequeño tamaño y a la pureza de sus componentes, los cometas constituyen un legado de valor incalculable de los primeros materiales que condensaron en el sistema solar. Pese a que *Rosetta* no traerá muestras, como en un principio se propuso, la misión ha demostrado ya una gran solidez y versatilidad científicas. El pasado 12 de noviembre, en un hito sin precedentes en la historia de la exploración espacial, el módulo aterrizador *Philae* se posaba por primera vez sobre la superficie de un cometa para estudiar in situ su composición.



Uno de los sectores del mosaico obtenido por el aterrizador *Philae* desde su lugar de «acometizaje» (*imagen*) ha revelado una estructura muy sólida dividida en diversas capas ricas en hielo.

Al tomar contacto, el aterrizador sufrió varios rebotes debido a un fallo en el funcionamiento de los arpones de agarre. Al final quedó varado en las proximidades de una pared abrupta que lo dejaba con apenas una hora de luz solar. Pero, aun en tales condiciones adversas, la robustez del ingenio le permitió completar sus experimentos durante las 60 horas que le dio de margen su batería principal.

De los veinticinco experimentos científicos de la misión, una decena conforman la instrumentación puntera empleada por *Philae* para estudiar el cometa. Gracias a ellos, este pequeño laboratorio interplanetario tomó imágenes sobrecogedoras del astro, «olió» su envoltura gaseosa, taladró la superficie y extrajo muestras para analizar las propiedades fisicoquímicas y su composición isotópica. Por medio del instrumento CONSERT, semejante en su funcionamiento a un escáner tridimensional, obtuvo también detalles relativos a la estructura interna de 67P.

En el momento de escribir estas líneas, se espera que el contacto con *Philae* se retome durante el verano de este año, cuando su proximidad al Sol le permitirá completar la carga de la batería secundaria. En ese momento podrá explorar la superficie del cometa en una fase en que el astro se encontrará mucho más activo en la producción de gas y polvo. Si todo transcurre con éxito, presenciaremos otro gran hito en la exploración del sistema solar.

Las imágenes obtenidas hasta ahora pueden considerarse revolucionarias por cuanto parecen haber demostrado que el modelo clásico propuesto por el astrofísico Fred L. Whipple (1906-2004), que veía los cometas como un agregado de partículas minerales, materia orgánica y diferentes tipos de hielo, no deja de ser una mera simplificación. La estructura de los cometas se antoja ahora mucho más rica. Los datos proporcionados por la misión apuntan a que estos astros tal vez se hayan creado a partir de la colisión de una pléyade de objetos, cuyo tamaño y composición dependería de la peculiar historia evolutiva de cada uno de ellos. En este sentido, los resultados de *Philae* y *Rosetta* tal vez nos permitan entender el origen de ciertas condritas carbonáceas presentes en los cometas en diversos grados de procesamiento.

Otro objetivo consiste en analizar el agua de 67P y esclarecer su posible relación con el origen de los océanos terrestres. El mes pasado, el equipo del espectrómetro de masas ROSINA publicó en la revista *Science* el primer análisis sobre la composición isotópica del gas presente en la coma de 67P. Los datos revelaron que la proporción entre deuterio e hidrógeno común triplicaba la del agua terrestre, un resultado que apoyaría la idea de que ciertos asteroides hidratados que producen condritas carbonáceas serían mejores candidatos para explicar cómo llegó el agua a nuestro planeta. Sin embargo, cabe enfatizar que la estadística es pobre y heterogénea: los otros dos cometas de la misma familia cuyo contenido en deuterio ha sido medido hasta ahora (45P/Honda-Mrkos-Pajdušáková y 103P/Hartley 2) han revelado una proporciones similares a la terrestre.

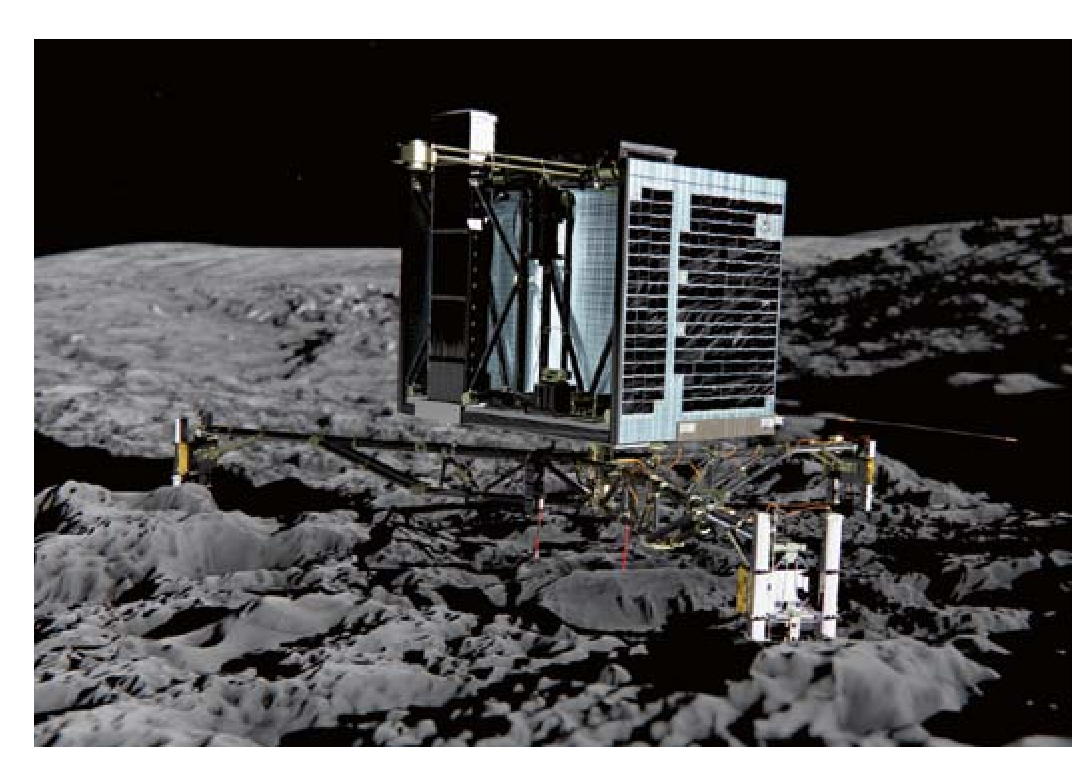
La complejidad inherente a la estructura de estos astros quedó patente en 1986, cuando una flotilla de sondas interplanetarias exploró el cometa 1P/Halley. Ahora, las impresionantes imágenes tomadas por *Rosetta* nos han mostrado que 67P es en realidad un objeto binario de contacto, formado por la colisión a baja velocidad relativa de dos cuerpos de pocos kilómetros de diámetro. Se trata de una de las numerosas sorpresas con las que esta ambiciosa misión ha asombrado al mundo.

Rosetta responde al ansia de saber de la humanidad, fascinada desde siempre por la diversidad de objetos que pueblan el firmamento y el sistema solar. Pero los cometas tal vez despierten, en cierto modo, un lejano eco de nuestros propios orígenes cósmicos, razón por la que no dejarán de maravillarnos.

Josep M. Trigo Rodríguez *es investigador del Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC) y del Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña*

Más allá de Neptuno, el «polvo» habría estado formado principalmente por partículas de hielo. Estas deberían haber generado objetos de tamaño planetario mediante un proceso similar. Sin embargo, dicho escenario adolece de dos problemas. Por un lado, los astrónomos no encuentran tales astros (si bien Brown sostiene que, por lo que sabemos, podría haber cuerpos del tamaño de Marte en la lejana nube de Oort, aunque las técnicas actuales no permitirían detectarlos). Por otro, en el cinturón de Kuiper no parece haber materia suficiente para explicar la existencia de objetos de ningún tamaño. Si el material de todos los OCK existentes hubiera comenzado como una nube de polvo helado, esta se habría dispersado tanto que nunca habría podido formar ningún astro.

Por lo tanto, la existencia misma del cinturón de Kuiper parece incompatible con el mecanismo al que los teóricos atribuyen su formación. Jewitt explica que la solución de consenso pasa por suponer que, en un principio, el cinturón de Kuiper albergó una cantidad de materia equivalente a la de 30, 40 o incluso 50 Tierras. Ello habría generado una gran multitud de objetos; después, algo provocó que la mayor parte de ese material se perdiese.



SOBRE EL TERRENO: Las perforaciones de *Philae*, el módulo aterrizador de *Rosetta* (*en la imagen, una simulación tridimensional*), permitirán estudiar con detalle la composición del cometa 67P.

CORTESÍA DE ESA Y ATG MEDIALAB

¿Cómo pudo ocurrir algo así? El mecanismo más plausible, propuesto originalmente por la física de la Universidad de Arizona Renu Malhotra, postula que los cuatro planetas gigantes del sistema solar (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) estuvieron una vez mucho más hacinados que en la actualidad. Malhotra y otros investigadores han argumentado que la interacción gravitatoria entre esa agrupación inicial de planetas gigantes y los OCK empujó a Saturno, Urano y Neptuno hacia el exterior. Al mismo tiempo, la interacción entre Júpiter, los OCK y los asteroides arrastró al gigante gaseoso hacia dentro. Dicho proceso no solo redistribuyó los planetas, sino que expulsó buena parte de los OCK hasta los confines de la influencia gravitatoria del Sol —lo que dio lugar a la nube de Oort— y atrajo los asteroides hacia el sistema solar interior.

Durante su migración, las órbitas de Júpiter y Saturno habrían entrado en resonancia; en concreto, por cada órbita de Saturno, Júpiter habría completado dos. El gran tirón gravitatorio generado por esa sincronización planetaria habría dispersado el 99 por ciento de los OCK. Algunos habrían terminado en la nube de Oort; otros se habrían estrellado contra los planetas interiores, en un cataclismo conocido como intenso bombardeo tardío.

Al menos un físico, David Nesvorný, del Instituto de Investigación del Sudoeste, ha llevado la idea un paso más allá. Sostiene que el sistema solar pudo haber albergado un quinto planeta gigante, el cual habría sido expulsado hacia el espacio interestelar durante esa violenta reestructuración.

Esa reorganización de los planetas gaseosos explicaría por qué el cinturón de Kuiper carece de objetos de gran tamaño: la materia que pudo haberlos formado se retiró de forma prematura. Además, los astros surgidos de dicho proceso deberían parecerse a los planetesimales, los pequeños cuerpos que más tarde se combinaron para formar los planetas. Así visto, el cinturón de Kuiper se asemejaría a una instantánea, congelada en el tiempo, del aspecto que presentaba el sistema solar interior pocos millones de años después de que se pusiera en marcha la formación de los planetas.

«La mayor incógnita que atañe al proceso de gestación planetaria es la formación de planetesimales: cómo surgieron y qué tamaño tenían», señala Hilke Schlichting, científica planetaria del MIT. Hace tiempo que esa información desapareció del sistema solar interior. No obstante, mediante la combinación de observaciones y modelos, Schlichting y sus colaboradores han demostrado que la distribución de tamaños de los OCK puede explicarse si se asume que los planetesimales de los que procedieron presentaban diámetros típicos de un kilómetro: una conclusión que, de ser cierta, bien podría aplicarse a los planetesimales que originaron los planetas interiores. «Tras décadas de cábalas, por fin estamos comenzando a aprender algo sobre las condiciones iniciales del proceso de formación de los planetas», apunta la investigadora.

PLUTÓN EN PRIMER PLANO

Esa combinación de modelos teóricos y observaciones ha permitido a los expertos hacerse una buena idea de la estructura y probable historia del cinturón de Kuiper. Pero, tal y como han demostrado las sondas que en el pasado han viajado a otros planetas, satélites o asteroides, eso no sustituye a la exploración in situ. «Una fotografía de Plutón tomada por el Hubble está muy bien, pero no ocupa más que unos pocos píxeles. Dentro de unos meses, Plutón se nos aparecerá como un mundo real», señala Stern.

Aquel mundo aún era un planeta cuando *New Horizons* partió a su encuentro en enero de 2006; su degradación a planeta enano se produjo el verano siguiente. Pero, con independencia de su clasificación, Stern y sus colaboradores intentarán aprender todo lo que puedan cuando la sonda sobrevuele Plutón y su satélite Caronte a casi 40.000 kilómetros por hora y a tan solo 10.000 kilómetros de su superficie.

Uno de sus objetivos será contar los cráteres que, casi con total seguridad, salpican el helado suelo de Plutón. La misión no solo proporcionará su número total, sino también cuántos hay de un diámetro determinado. A partir de esa información, los astrónomos podrán hacerse una idea independiente de la distribución de tamaños de los OCK, ya que cabe esperar que los objetos de distinto tipo se hayan estrellado contra el planeta enano con una frecuencia proporcional a su abundancia relativa.

En el pasado, el sistema solar pudo haber albergado un quinto planeta gigante gaseoso que habría sido expulsado al espacio interestelar

Pero la misión irá más allá. En el curso del tiempo, los cráteres de Plutón se han ido erosionando a causa de los mismos procesos que han creado su tenue atmósfera: el repetido calentamiento y enfriamiento de la superficie a medida que el astro va y viene en su elongada órbita. Caronte, sin embargo, carece de envoltura gaseosa, por lo que ha preservado todos los impactos. «La comparación entre ambos nos permitirá conocer la historia de esos choques; es decir, qué tamaño presentan los proyectiles actuales con respecto a los del antiguo cinturón de Kuiper», explica Stern.

New Horizons también buscará posibles rastros de un océano bajo la superficie de Plutón, al igual que ocurre bajo las espesas capas de hielo de algunas de las lunas de Júpiter y Saturno, como Europa, Ganímedes, Encélado y Titán. Si la sonda observa géiseres y volcanes helados, los expertos tendrán razones para pensar que el interior del astro es cálido y contiene agua, tal vez como resultado de desintegraciones radiactivas en un núcleo rocoso. Y aunque no se detecten señales externas de calor, las cámaras infrarrojas de la nave podrán localizar regiones cálidas en la superficie. La idea de que Plutón albergue vida no deja de ser completamente especulativa; pero, dado que el agua líquida se considera un requisito imprescindible para los procesos biológicos tal y como los conocemos, un hallazgo así otorgaría cierta legitimidad a dicha especulación.

La nave espacial hará todo eso y mucho más en cinco meses. El momento más intenso del estudio tendrá lugar durante el día en que la sonda sobrevuele a toda velocidad el planeta enano. En cualquier caso, los científicos deberán esperar unos 16 meses hasta disponer de todos los datos. En el proceso de transmisión, cada bit de información deberá atravesar los casi 5000 millones de kilómetros que separarán la sonda de nuestro planeta.

BAILE CON UN COMETA

A diferencia de *New Horizons*, que sobrevolará su objetivo a toda velocidad, *Rosetta* orbitará en torno a 67P durante 15 meses. Gracias a ello, podrá dar respuesta a toda clase de preguntas sobre la composición química y estructura interna del astro; pistas de gran valor para entender las propiedades del gas y el polvo que originaron el cinturón de Kuiper y la manera en que se formaron los OCK. Hoy por hoy, la comprensión de los expertos sobre estas cuestiones es tan rudimentaria que no esperan ninguna señal inconfundible que corrobore una teoría y descarte el resto. Sin embargo, puede que los hallazgos de *Rosetta* ayuden a los investigadores a elaborar una teoría sólida.

La misión también proporcionará un asiento de primera fila para contemplar cómo se despertará el cometa a medida que se aproxime al Sol. «Estaremos junto al cometa durante el verano de 2015. En ese momento se producirá el máximo de actividad y el núcleo expulsará 1000 kilos de material por minuto», explica Matt Taylor, investigador principal de la misión. Los expertos ignoran si dicho material se desprende por igual de toda la superficie del cometa o si, por el contrario, solo emerge desde pequeños puntos activos. La respuesta, que llegará dentro de unos meses, ayudará a los científicos planetarios a entender cómo y por qué estos astros acaban perdiendo su hielo y consumiéndose.

Rosetta también debería responder algunas preguntas relacionadas con nuestro propio planeta. En particular, ¿de dónde procede el agua de la Tierra? Numerosos expertos creen que fue depositada por una tormenta de cometas cuando el sistema solar aún era joven. *Rosetta* pondrá a prueba esta hipótesis al medir la composición isotópica del agua de 67P. La sonda y su módulo de aterrizaje, *Philae*, también se coordinarán para determinar si los cometas constituyen grandes monolitos de hielo sucio o si, por el contrario, se hallan compuestos por fragmentos menores aglomerados por efecto de la gravedad. Cuando *Rosetta* y *Philae* se hallen en lados opuestos del astro, el módulo orbital enviará una señal de radio hacia el aterrizador, que la reflejará. El experimento, análogo a un TAC, revelará por primera vez la estructura interna de un cometa.

Por desgracia, 67P nunca podrá observarse a simple vista. Al igual que ocurre con Plutón y con la gran mayoría de los OCK, tales objetos solo pueden detectase con la instrumentación adecuada. Eso explica por qué hasta hace muy poco los astrónomos ni siquiera sabían de su existencia, por no hablar de su importancia a la hora de entender la historia y la arquitectura del sistema solar. A finales de este año, gracias a dos sondas que emprendieron sus respectivos viajes hace casi una década, nuestro conocimiento será incomparablemente mejor.

PARA SABER MÁS

On the existence of a comet belt beyond Neptune. Julio A. Fernández en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 192, n.º 3, págs. 481-491, septiembre de 1980.

Discovery of a planetary-sized object in the scattered Kuiper belt. M. E. Brown et al. en *Astrophysical Journal Letters*, vol. 365, n.º1, págs. L97-100, 10 de diciembre de 2005.

The Pluto files: The rise and fall of America's favorite planet. Neil deGrasse Tyson. W. W. Norton, 2009.

EN NUESTRO ARCHIVO

El cinturón de Kuiper. Jane X. Luu y David C. Jewitt en *IyC*, julio de 1996.

Migración planetaria. Renu Malhotra en *IyC*, noviembre de 1999.

LINGÜÍSTICA

LA RIQUEZA IDIOMÁTICA DE LOS ANDES

La comparación entre las lenguas actuales y algunos documentos españoles ha aportado nuevos datos sobre el desarrollo de las civilizaciones andinas

Paul Heggarty

NO CONOCÍAN EL HIERRO NI LA RUEDA. TAMPOCO LOS CABALLOS, los animales de tiro, los mercados ni el dinero. Sin embargo, los incas conquistaron un reino que se extendió desde el actual Ecuador hasta lo que hoy es Argentina y cuyas regiones naturales incluían bosques, desiertos, mesetas y la gélida cordillera de los Andes. Su imperio supuso la culminación de una historia milenaria a lo largo de la cual surgieron y desaparecieron numerosas culturas, algunas de carácter regional y otras muy influyentes, como la chavín o la huari.



THINKSTOCK/TOSE

EN SÍNTESIS

Hoy, la familia lingüística dominante en la región de los Andes es el quechua, seguido del aimara. Existe asimismo una presencia aislada del uru; hasta comienzos del siglo XIX se hablaba también el puquina.

La lingüística histórica comparada intenta reconstruir la evolución de los idiomas y sus relaciones de parentesco. Hasta hace poco, ese análisis no se había aplicado al estudio de la América precolombina.

La comparación con los datos arqueológicos sugiere un espectro lingüístico muy heterogéneo entre las principales civilizaciones andinas. A menudo, esa diversidad parece remitir a la riqueza natural de la región.



UN PASADO COMPLEJO: Las terrazas agrícolas, como la que muestra esta imagen de las ruinas de Pisac (*círculo amarillo*), en Perú, fueron consideradas durante largo tiempo un logro de los incas. Sin embargo, ya existían en tiempos de los huari. Es probable que este pueblo fuese el responsable de la primera expansión del quechua y, tal vez, también del aimara.

Diversas disciplinas han intentado reconstruir cómo se desarrollaron los acontecimientos. Los arqueólogos estudian el legado material de aquellos pueblos; los paleoclimatólogos analizan los sedimentos marinos y el hielo de los glaciares; los arqueobotánicos y arqueozoólogos investigan las plantas y los animales del pasado; los químicos intentan rastrear los movimientos migratorios a partir de la composición isotópica de los restos humanos; los biólogos moleculares comparan las antiguas secuencias genéticas con las de los habitantes actuales... Todo ello ha permitido identificar diversas culturas, asignarlas a diferentes fases de la historia andina y esclarecer sus influencias mutuas, sus conquistas y su dispersión por el continente.

Existe, sin embargo, una fuente de información cuya importancia ha sido subestimada hasta hace poco: las antiguas lenguas de América. Durante largo tiempo, los historiadores les han concedido un interés moderado. Se creía que, del mismo modo que el Imperio romano difundió el uso del latín, todas las variantes del quechua remitían a Cuzco, la capital inca. El aimara que hoy se habla en la región del lago Titicaca se consideraba originario de la antigua cultura de Tiahuanaco, anterior a la inca. El puquina, ya extinto, y el uru, limitado hoy a unos pocos hablantes, fueron prácticamente ignorados. Hace pocos años, sin embargo, los lingüistas comenzaron a convencer a arqueólogos y genetistas de la importancia de su disciplina para investigar la América precolombina.

Al analizar sus semejanzas y diferencias, los expertos pueden deducir parentescos e influencias entre las lenguas. La lingüística histórica comparada intenta reconstruir esas relaciones en el espacio y en el tiempo. Hace poco, esta disciplina comenzó a adaptar para sí los modelos que paleontólogos y biólogos evolutivos emplean para estudiar la filogenia de las especies. Es cierto que la comparación entre los idiomas (sus palabras, significados, fonemas y gramáticas) y el material genético no puede llevarse demasiado lejos, pues los primeros dan lugar a códigos mucho más complejos que el que puede construirse con cuatro moléculas. Sin embargo, en combinación con los métodos arqueológicos tradicionales, esta nueva técnica ha permitido obtener resultados sorprendentes.



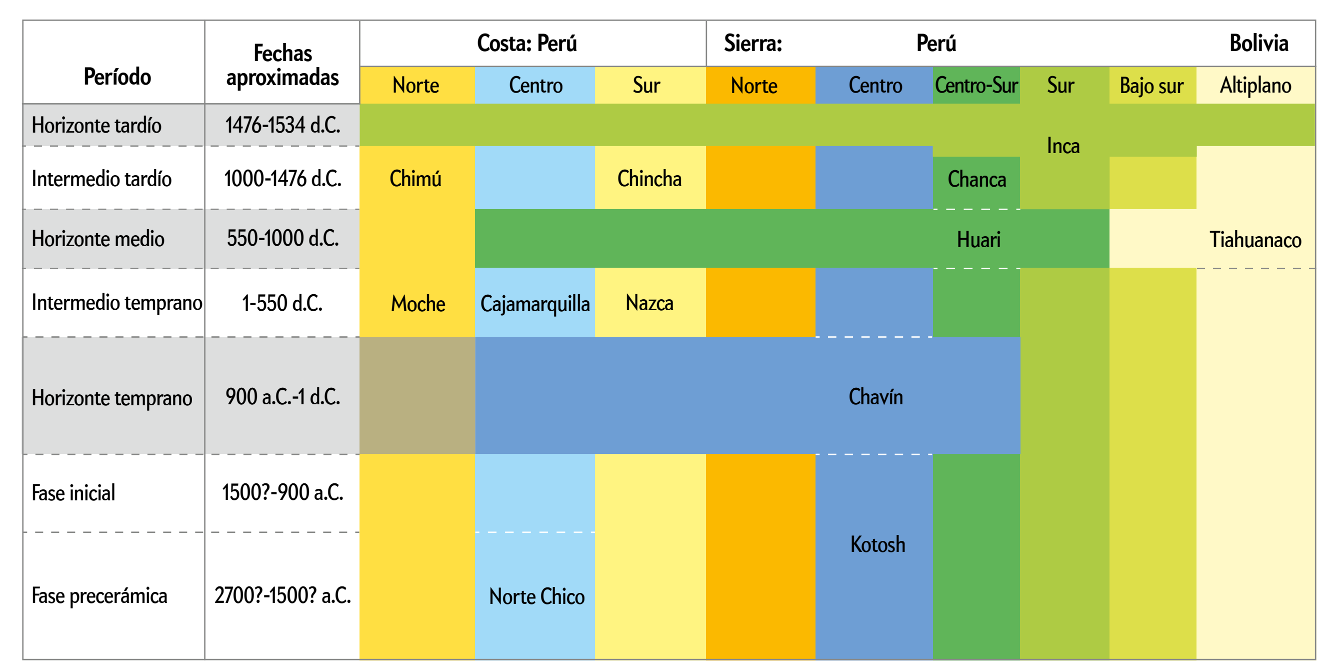
Paul Heggarty investiga en el departamento de lingüística del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva de Leipzig.

MOVIMIENTOS MIGRATORIOS

Según se desprende de tales investigaciones, las áreas de extensión de las actuales lenguas andinas no pueden trasladarse sin más a los idiomas del pasado. Ello se debe sobre todo a las migraciones incas, que desplazaron grandes masas de población, entre otros fines, para disponer de mano de obra para la construcción de carreteras, de soldados para las campañas militares, y también para aislar a los grupos rebeldes. Según Terence D'Altroy, arqueólogo de la Universidad de Columbia en Nueva York, aproximadamente un tercio de la población tuvo que abandonar su lugar de origen para realojarse a miles de kilómetros de distancia.

La genética apenas logra seguir la pista a esas migraciones. Aunque en las zonas limítrofes del Imperio incaico la situación resulta algo más clara, en la región central de los Andes la enorme mezcla del patrimonio genético ni siquiera permite diferenciar entre los hablantes de quechua y los de aimara.

Las investigaciones lingüísticas, en cambio, sugieren una migración de la región de Cuzco hacia Potosí. El quechua hablado allí resulta tan similar al cuzqueño que, sin duda, hubo de originarse en esa región, con una evolución propia que solo



Período	Fechas aproximadas	Costa: Perú			Sierra: Perú					Bolivia
		Norte	Centro	Sur	Norte	Centro	Centro-Sur	Sur	Bajo sur	Altiplano
Horizonte tardío	1476-1534 d.C.							Inca		
Intermedio tardío	1000-1476 d.C.	Chimú		Chincha			Chanca			
Horizonte medio	550-1000 d.C.						Huari			Tiahuanaco
Intermedio temprano	1-550 d.C.	Moche	Cajamarquilla	Nazca						
Horizonte temprano	900 a.C.-1 d.C.					Chavín				
Fase inicial	1500?-900 a.C.									
Fase precerámica	2700?-1500? a.C.		Norte Chico			Kotosh				

DATOS SEGÚN PAUL HEGGARTY Y DAVID BERESFORD-JONES

HORIZONTES E INTERMEDIOS: La división tradicional de la cronología andina responde al legado material de sus pueblos. Los americanistas han llamado «Horizontes» a aquellos períodos en los que una civilización dominó un territorio extenso. Los «Intermedios» se caracterizan por la emergencia de varias culturas de importancia regional o local.

FAMILIA	QUECHUA			AIMARA	URU	PUQUINA
Numeral	Ecuador	Huancayo	Cuzco	Tiahuanaco	Chipaya	Tiahuanaco?
1	ʃux	huk	hɔχ	maja	tsʰi	huksto
2	iʃki	iʂkaj	iskaj	paja	piʃk	so
3	kimsa	kimsa	kinsa	kimsa	tʃʰɛɸ	kappa
4	tʃusku	tawa	tawa	pusi	paχpik	sper
5	pitʃka	pitʃʔa	pisqa	pʰisqa	taxʃnuku	takpa
6	suxta	suuʔta	sɔχta	sɔχta	sɔχta	tʃitʃu
7	kantʃis	ʔantʂiʂ	qantʃis	pa.qalqo	pa.qalqo	stu
8	pusax	pusax	pusaχ	kimsa.qalqo	kinsa.qalqo	kinas
9	iskun	isʔuŋ	isqɔŋ	ʎaatuŋka	ʎaatuŋka	tʃeka
10	tʃuŋga	ʈʂuŋka	tʃuŋka	tuŋka	tuŋka	skata

EN AIMARA, **los números 7 y 8 se expresan como 2-*qalqo* y 3-*qalqo*. Es probable que la raíz léxica *qalqo* significase «cinco», la base numérica original del aimara. Más tarde, fue sustituido por la palabra quechua *pichqa* (*cada color indica un origen común; transcripciones según el alfabeto fonético internacional*).**

DATOS SEGÚN PAUL HEGGARTY Y WILLEM ADELAAR

pudo haber comenzado hace apenas unos siglos. Los causantes de ese movimiento habrían sido los españoles, que trasladaron mano de obra hacia las minas de plata de Potosí.

En cambio, el quechua de las zonas montañosas de Ecuador presenta rasgos propios muy marcados, lo que apunta a una separación de la rama cuzqueña muy anterior a la conquista del territorio por parte de los incas. Algunos elementos remiten como posible fuente a regiones del actual Perú muy alejadas de Cuzco. Y, en efecto, sabemos que existió una segunda capital incaica: la ciudad de Quito, que contaba con una gestión e incluso una corte propias. Cabe suponer que su establecimiento necesitó o propició la migración de grupos procedentes de varias zonas del imperio, los cuales hablaban sus respectivos dialectos del quechua.

Al mismo tiempo, la comparación entre idiomas ha permitido demostrar que, siglos antes de la expansión inca, el quechua ya se hablaba en una amplia región que abarcaba más de 800 kilómetros de tierras altas: un área que los investigadores han denominado Zona Continua del Quechua. Esta circunstancia obliga a admitir la existencia de un protoquechua, el cual se habría expandido hace al menos mil años.

Hasta hace poco, el árbol genealógico del quechua trazado por los filólogos incluía dos ramas principales, así como varias ramificaciones asociadas al pueblo chanca y a las culturas de Cajamarquilla y Chincha. Los arqueólogos han situado estas civilizaciones en diferentes «Intermedios»; es decir, en aquellas fases de la historia andina caracterizadas por la aparición de diversas culturas locales y regionales. Sin embargo, el recorrido del protoquechua difícilmente puede explicarse sin la expansión de una cultura o un poder dominantes. Entretanto, en algunas poblaciones montañosas remotas, los lingüistas han identificado varios dialectos del quechua que no pueden adscribirse a ninguna de las dos ramas principales. Por todo ello, esta familia lingüística es vista hoy como una red compleja que, sin embargo, apunta a una fase expansiva a lo largo de toda la Zona Continua hace más de un milenio.

Su impulsor pudo haber sido el Imperio huari, una de las culturas dominantes durante la fase conocida como «Horizonte medio», entre los años 550 y 1000 de nuestra era. Al contrario que los Intermedios, los Horizontes designan períodos de la historia andina en los que una o varias civilizaciones gozaron de una expansión territorial considerable. Cabe señalar que el concepto refleja el punto de vista arqueológico, puesto que se asocia al hallazgo de un gran número de restos con características comunes a lo largo de una región extensa. No obstante, si tal expansión se produjo como consecuencia del poder político o del militar es algo que —a excepción del caso inca, en el Horizonte tardío— constituye objeto de debate.

QUECHUA Y AIMARA

El centro del Imperio huari se situaba a 2770 metros de altura, cerca de la actual Ayacucho, al sur de la sierra central peruana. Allí vivieron, en una zona de 15 kilómetros cuadrados que hoy constituye el mayor yacimiento arqueológico del continente americano, entre 20.000 y 100.000 habitantes. El Imperio huari duró unos 450 años y cayó hacia el cambio de milenio, una cronología que casa bien con los análisis lingüísticos del quechua.

Desde un punto de vista geográfico, la influencia huari coincide en gran medida con la Zona Continua, sobre todo en regiones con altitudes comprendidas entre los 2300 y 3500 metros, más aptas para el cultivo del maíz. La productividad agrícola mejoró gracias a los huertos en forma de terraza y al desarrollo de sistemas de regadío, lo que seguramente propició un aumento de la población. Por otro lado, los arqueólogos han constatado que la red de caminos atribuida en un principio a los incas probablemente fuera ideada en gran parte por los huari. Sus logros culturales no solo incluyen algunas formas tempranas del quipu (un sistema mnemotécnico que, a falta de escritura, hacía uso de cuerdas y un código de nudos), sino también, a juicio de varios expertos, la primera expansión del quechua.

Al sudeste del imperio, en el corazón del Altiplano andino, floreció una cultura rival: la tiahuanacota, con centro en la ciudad de Tiahuanaco, muy cerca del lago Titicaca. Aunque hoy se habla allí el aimara, este es tan homogéneo que su llegada solo pudo haberse producido hace poco. Los filólogos han identificado variaciones del aimara mucho más acusadas —y, por tanto, ramificadas con anterioridad— en regiones muy alejadas de la zona de influencia de Tiahuanaco; entre ellas, el jacaru, una lengua de la región central de Perú que apenas hablan unos centenares de personas. Entre los indicios más antiguos que atestiguan la existencia del aimara figuran varios topónimos de zonas en las que hoy se hablan otros idiomas. Por último, una tercera fuente de información la hallamos en los documentos de los conquistadores españoles.

Aunque durante largo tiempo se pensó que la civilización huari fue la responsable de la difusión del aimara, hoy las investigaciones lingüísticas y arqueológicas le otorgan un papel clave en la diferenciación del quechua. Pero ¿pudo una misma cultura fomentar el uso de dos idiomas al mismo tiempo? A este respecto, varios estudios han sacado a la luz claras interacciones entre ambos. Una posible explicación tal vez se halle en las

Horizonte temprano: Chavín



Horizonte medio: Huari y Tiahuanaco



FLUJO CULTURAL: De la mano de la arqueología y la historia natural, la lingüística ha conseguido en los últimos años reconstruir la evolución de las lenguas andinas. Según se desprende de estas investigaciones, hubo tres fases principales de expansión de las grandes familias lingüísticas, espoleadas por la influencia de algunas civilizaciones precolombinas. Las zonas de expansión (*colores*) son aproximadas. Los mapas muestran los principales yacimientos arqueológicos de las civilizaciones correspondientes.

características ecológicas de los Andes. El maíz deja de crecer por encima de los 3700 metros, por lo que en tales zonas se cultivaban tubérculos y se criaban llamas y alpacas. Puede que los distintos sistemas de subsistencia correspondiesen a poblaciones diferentes, las cuales habrían entablado relaciones simbióticas de intercambio. Así, mientras que quienes cultivaban maíz habrían hablado quechua, los pastores habrían usado el aimara.

Sin embargo, algunas reliquias halladas en las regiones huari apuntan a un empleo del aimara anterior al del quechua y, por tanto, previo a los huari del Horizonte medio. En su búsqueda de una hipótesis alternativa, los arqueólogos han dado con otro candidato para explicar la expansión del aimara: la cultura chavín, la cual se remonta al Horizonte temprano, entre el siglo IX y el I antes de nuestra era. Su centro neurálgico se hallaba en la ciudad de Chavín de Huántar. Situada a 3180 metros de altitud en la zona central del Perú, sus monumentales templos siguen causando fascinación aún hoy. Se ha documentado la influencia de la cultura chavín en el sur, donde siglos más tarde apareció la civilización huari. Esta llegó a controlar algunos territorios del norte que anteriormente habían pertenecido a los chavín. El contacto entre ambos grupos de hablantes habría quedado reflejado en varios indicios lingüísticos y arqueológicos, según los cuales el aimara se habría originado y difundido gracias a la cultura chavín, mientras que los huari habrían desempeñado un papel análogo en lo referente al quechua.



RITOS PRECOLOMBINOS: Las torres funerarias para la élite (*en la imagen, en el yacimiento peruano de Sillustani*) constituyen un rasgo distintivo de la civilización colla. Sus miembros probablemente fueron hablantes de puquina, una lengua ya extinta.

Sin embargo, la escasez de restos arqueológicos a medida que retrocedemos en el tiempo impide decantarse por cualquiera de estas teorías. En comparación con el quechua, se conocen muchos menos detalles sobre las variantes extintas del aimara, lo que ni siquiera permite demostrar si se originó durante el Horizonte temprano o no. Algunos topónimos de su zona de influencia parecen apuntar a una expansión del aimara por parte de los chavín, si bien tales pruebas resultan mucho menos concluyentes que las que remiten a las voces de una lengua en uso.

Por tanto, el desarrollo y la expansión de la familia del aimara continúan envueltos en múltiples incógnitas. Solo la mencionada conexión con la cultura tiahuanacota se cree ahora improbable. Sin embargo, algunas hipótesis recientes han intentado explicar la aparición del aimara en la costa del Titicaca de una forma inesperada: por medicación inca.

Hoy sabemos que en la región de Cuzco no solo se hablaba el quechua, sino también el aimara. Así lo atestiguan topónimos como Vilcanota, «el río sagrado», o el mismo nombre de Cuzco. Así pues, la temprana expansión de los incas hacia la zona del lago podría explicar la llegada del aimara a la zona hace más de 600 años. En sus conquistas hacia el norte, habrían tomado de los huari no solo su infraestructura, sino también, y por puro pragmatismo, el quechua hablado allí. Eso podría explicar por qué la variante norteña se erigió en una lengua administrativa, pero no así el quechua de Cuzco.

PUQUINA Y URU

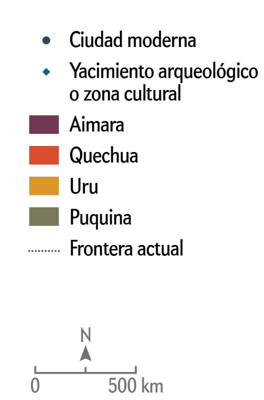
A principios del Horizonte tardío (es decir, en tiempos del dominio inca), en la región del lago Titicaca se hablaban otras dos

Horizonte tardío: Inca



Presente





lenguas: puquina y uru. Poco a poco, estas se vieron desplazadas por sus dos grandes rivales y, más tarde, también por el castellano. Los documentos españoles sugieren que el puquina se habló hasta principios del siglo xix. Aún pueden oírse algunas de sus voces en callahuaya, un idioma ritual usado por los curanderos de las zonas montañosas al este del Titicaca. Por lo demás, solo conocemos un breve texto de catequesis que data de la época colonial española. La cuarta lengua, el uru, se extinguió en las zonas costeras durante el siglo xx, aunque sigue hablándose en el pueblo de Chipaya, unos cientos de kilómetros al sur del Titicaca.

Para sorpresa de los americanistas, los lingüistas han logrado identificar a los hablantes ancestrales del puquina: los pobladores de la región de Tiahuanaco, donde este idioma se erigió como lengua principal durante el Horizonte medio. Rodolfo Cerrón Palomino, de la Pontificia Universidad Católica del Perú, ha demostrado que, tras la caída de Tiahuanaco, el relevo en el uso del puquina fue a parar a los colla. Hasta hace poco, los arqueólogos habían supuesto que este grupo, establecido en Sillustani (yacimiento famoso por sus *chullpas*, o torres funerarias) y de importancia regional considerable, era un «señorío aimara».

Pero Cerrón-Palomino también halló rastros del puquina en la región de Cuzco; sobre todo, en la denominación de ciertos lugares sagrados y en los nombres de varios de los primeros gobernantes incas. Hacía tiempo que los arqueólogos habían mostrado desconcierto por las notables semejanzas entre algunos monolitos incaicos y los de la cultura tiahuanacota. Pero, a pesar de la existencia de un mito local que asocia el origen de los incas con el lago Titicaca, los expertos nunca habían dado excesivo crédito a un nexo entre ambos. Ahora, las investigaciones lingüísticas más recientes sugieren que tales mitos podrían tener una base histórica.

Dado que los tiahuanacotas no fueron tan poderosos como los huari, coetáneos suyos, algunos arqueólogos rehúsan hablar de «imperio» y prefieren emplear expresiones más neutras, como «esfera de influencia». En cualquier caso, cuando Tiahuanaco llegó a su fin, un grupo de exiliados tal vez encontrase su hogar en el valle de Cuzco. Cuando los incas conquistaron el lago Titicaca, repoblaron allí a grupos aimaras de la región cuzqueña, lo cual explicaría su actual presencia en la zona.

La cuarta lengua, el uru, nunca perteneció a una cultura dominante. Sus hablantes, apodados «hombres de agua», vivieron bastante ajenos al resto en las islas del lago Titicaca o en las zonas inundadas al norte de los salares de Coipasa y Uyuni. Incluso los españoles desistieron de gravarles con impuestos. Probablemente, ese aislamiento haya desempeñado un papel clave en la supervivencia de la lengua.

Así pues, y al contrario de lo que ocurría con las grandes culturas del Viejo Mundo, la región andina presentaba en su conjunto un espectro lingüístico inesperadamente heterogéneo. Y si bien esa diversidad obedece a varias razones, todas ellas parecen remitir a la variedad natural y paisajística de los Andes. La corriente de Humboldt mantiene la lluvia alejada de las costas del Pacífico, pero la gran abundancia de nutrientes garantiza una amplia diversidad de vida marina. Al contrario que en Eurasia, las culturas andinas de hace casi cinco milenios no se basaron en el cultivo de cereales, sino en la pesca. Por otro lado, las zonas más áridas y hostiles aislaron e incomunicaron a los distintos grupos. No fue sino hasta el año 1000 antes de nuestra era —varios milenios después que en el Viejo Mundo— cuando la práctica de la agricultura permitió un crecimiento considerable de la población y, con ello, la proliferación y diferenciación de las familias lingüísticas.

PARA SABER MÁS

Archaeology and language in the Andes. Dirigido por P. Heggarty y D. G. Beresford-Jones. Oxford University Press, 2012

Las lenguas de los incas: El puquina, el aimara y el quechua. R. Cerrón Palomino. Peter Lang AG. Fráncfort, 2013.

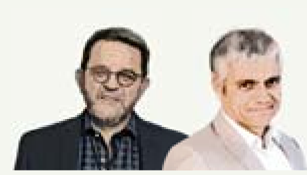
The Incas. T. N. D'Altroy. Wiley-Blackwell. Oxford, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los quipus incas. Loïc Mangin en *IyC*, diciembre de 2005.

ENERGÍA Y TRANSPORTES
Nuevos paradigmas para la innovación

Ronan Stephan
responsable de innovación para el Grupo Alstom.



Robert Plana, responsable de investigación y desarrollo con las universidades para el Grupo Alstom.

Los actuales retos globales tienen un impacto directo en el desarrollo tecnológico de este siglo XXI, al requerir soluciones nuevas, complejas y a menudo sistémicas, cada vez más orientadas hacia el ser humano. De ellas derivan un nuevo modo de pensar la investigación, de llevarla a cabo, nuevas metodologías de desarrollo, así como una innovación abierta al mundo, decididamente interdisciplinaria y en gran medida inspirada en lo digital.

Lo mismo que muchos ámbitos científicos, aquellos volcados en los problemas de energía y transporte se encuentran actualmente intrincados en movimientos globales de urbanización, cambio climático y agotamiento de los recursos naturales. Estos retos planetarios interdependientes demandan respuestas sistémicas. La creciente producción de energías renovables impone, por tanto, nuevas soluciones, tanto de transmisión y almacenamiento de la energía como de gestión del consumo. Todo ello se traduce en nuevas arquitecturas, cada vez más complejas (red eléctrica inteligente o *smart grid*, sistema de movilidad multimodal, etc.), en sistemas cuyos rendimientos están cada vez en mayor medida destinados a ser optimizados en su conjunto, y no a través de sus componentes considerados de forma individual.

Esta nueva complejidad puede compararse con las arquitecturas de la vida y estimula el recurso a analogías biológicas, donde todo se basa en un equilibrio dinámico entre los subsistemas. Estas nuevas cuestiones científicas, vistas a la luz de diferentes disciplinas, abren nuevos caminos y ofrecen atisbos de comprensión, lo que permite modelizar estas nuevas arquitecturas y predecir su comportamiento. Resulta esencial saber detectar estas débiles señales, observaciones paradójicas que estimulan la reflexión y la intuición: “esto me hace pensar en…”.

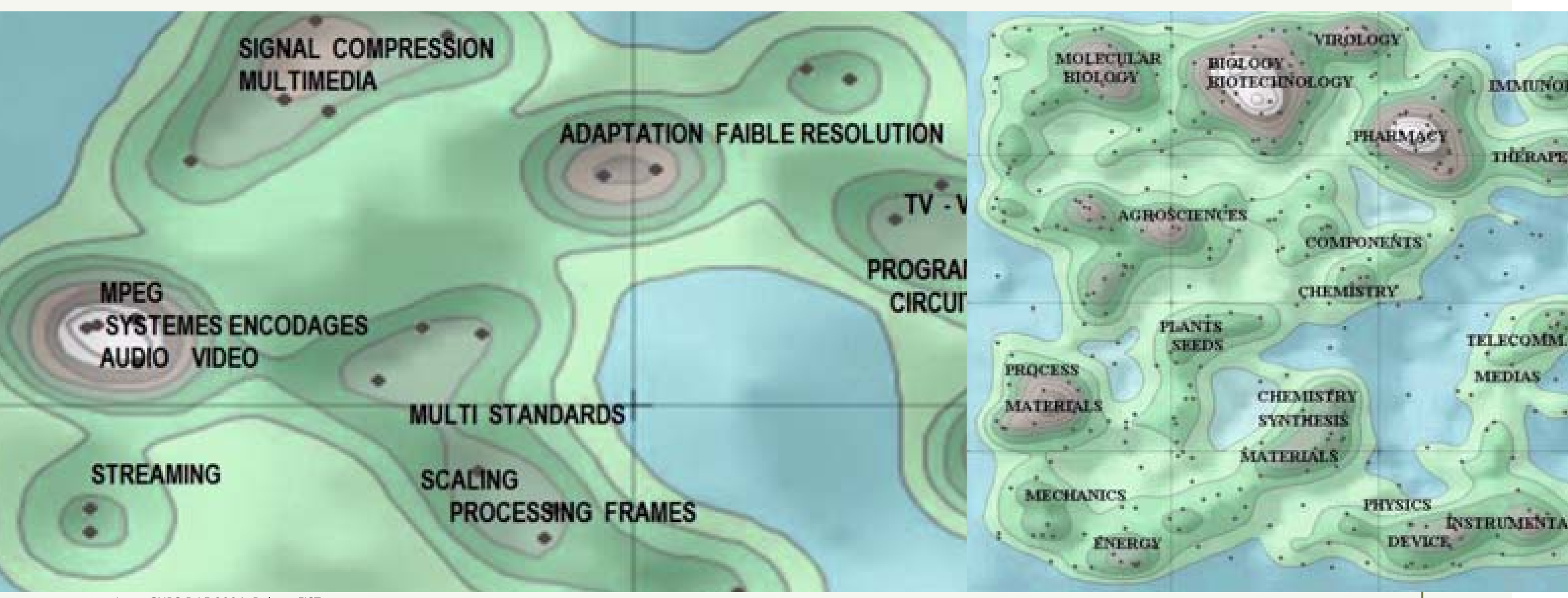
NUEVOS PARADIGMAS SOCIALES Y COGNITIVOS

Esta es la clave del razonamiento mediante analogías, que, por un lado va a desencadenar la comprensión y, por tanto, el dominio de los fenómenos, y por otro lado va a facilitar nuevos encuentros que permitirán abordar un problema desde un punto de vista original. A título de ejemplo, las inspiraciones derivadas de nuestros conocimientos del sistema inmunitario pueden darnos ideas para mejorar la transmisión de señales y, sobre todo, la protección de las redes de intercambio de datos.

Cada vez más, estos sistemas forman tecnologías al servicio del ser humano: el uso, la ergonomía, la percepción y las expectativas del usuario están en el corazón de su concepción. Por tanto, vemos salir a la luz nuevos paradigmas cuyos principales determinantes ya no son exclusivamente tecnológicos, sino también sociales y cognitivos. De todo ello se deriva una adaptación contextual: cultural, geopolítica y ambiental. Ya no existe *una* solución universal, sino *varias* soluciones a medida para los pliegos de condiciones que difieren de un país a otro, de una fuente de energía dominante a otra. Sin olvidar que la dimensión de los usos, que a su vez difieren de un lugar a otro, debe estar bien formalizada.

En los ámbitos de la energía y el transporte, estos grandes cambios necesarios orientan el modo de proceder en la investigación, el desarrollo y la innovación. Por lo tanto, podemos hablar de soluciones flexi-





Izq. : CNRS-DAE 2004. Dcha. : FIST s.a.

Las técnicas de mapeo ayudan a las empresas a localizar sus patentes y a compararlas con las de sus competidores. También muestran áreas de oportunidades y riesgos.

bles, reconfigurables (por ejemplo, a través de una tarificación dinámica); de soluciones utilizables en tiempo real (para recargar los coches eléctricos); de seguimiento dinámico de los equipos y sistemas (en el caso de la aeronáutica); de seguimiento dinámico de la calidad de servicio (a través de Internet); de optimización en tiempo real del nivel de producción y de almacenamiento de energía (mediante verdaderos sistemas de explotación de *smart grids*).

HERRAMIENTAS PARA UNA NUEVA ORGANIZACIÓN

En esta época de grandes cambios, las referencias establecidas han sido derrocadas, también para las industrias denominadas “tradicionales”. Los instrumentos clásicos son sustituidos por herramientas más inteligentes, compartidas, distribuidas, cooperativas y en constante mejora. Esta revolución, ampliamente irrigada por la transformación digital, es de una intensidad al menos equiparable a la de Internet hace ya veinte años. Los potenciales de estas nuevas herramientas, ampliamente descritos en los corpus de la *open innovation*, definen una nueva relación con la fabricación (con robots), una mediación de los intercambios y una nueva ergonomía social (mediante las redes sociales colaborativas), nuevos procesos de análisis y de supervisión (con la búsqueda de grandes cantidades de datos). Estas herramientas, que ya han comenzado a modificar la organización empresarial y su relación con los mercados, son asimismo capaces de arrojar luz a su entorno y a sus posibles futuros. Vienen a completar el arsenal utilizado para detectar las señales más débiles y dar cabida al sentido que pueda derivarse de ellas o, en otras palabras, para repensar la estrategia.

Hoy en día, recopilamos –o captamos– estas señales presentes de diferentes maneras: de forma analógica, de forma digital, o bien recurriendo a la inteligencia colectiva.

La vía analógica consiste en establecer y desarrollar colaboraciones abiertas con las universidades, las organizaciones de investigación y, de un modo más general, con el conjunto de los actores de los grandes ecosistemas innovadores. Estos espacios de convivencia y exposición de conceptos, entre investigadores e industriales, estimulan la exploración científica y arrojan luz a los problemas industriales, con independencia de en qué punto se encuentren en la escala de madurez tecnológica. Estas miradas cruzadas y estos diálogos, cuando se mantienen en el tiempo, fertilizan la relación y hacen emerger nuevas ideas y, a veces incluso, de forma muy precoz, nuevos campos de investigación científica.

La vía digital explota las masas de datos disponibles en la actualidad (sobre los usuarios, sus usos, los equipos, etc.) a través de tratamientos rápidos y apropiados para extraer de ellos representaciones de información pertinente sobre los aspectos emergentes. Esta segunda vía abre evidentemente la puerta a nuevos enfoques en materia de inteligencia económica, otorgando una mayor capacidad de reacción a las organizaciones en la simulación estratégica y en la toma de decisiones.

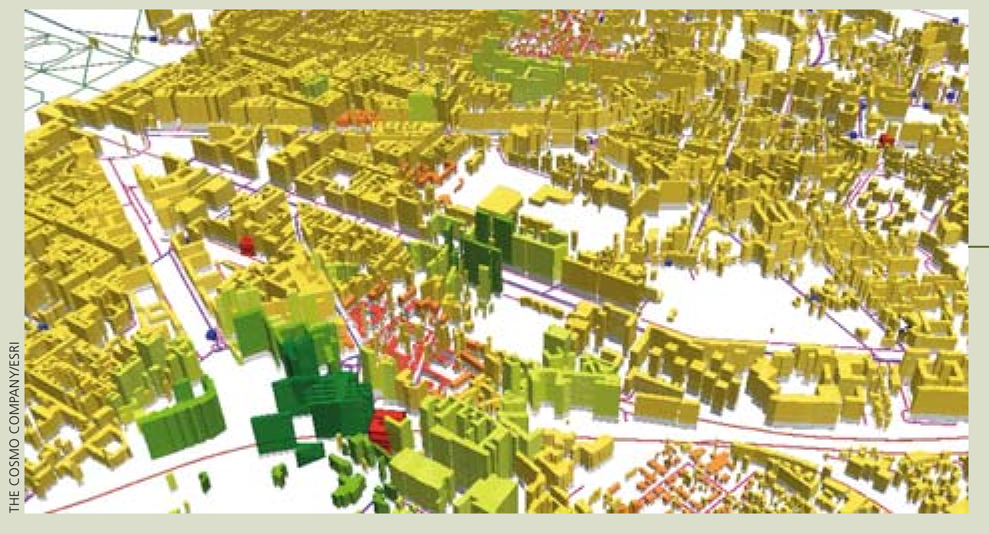
La tercera vía corresponde a la inteligencia colectiva. Hibrida las dos primeras, tomando lo mejor de cada mundo. Asiste a la constitución de comunidades físicas sobre aspectos estratégicos y las alimenta mediante contenidos digitales. A título de ejemplo, Alstom ha instaurado este nuevo concepto en el marco de un nuevo desarrollo basado en una red social corporativa dedicada a la



SIMULACIÓN

La modelización de la ciudad

The CoSMo Company es una *start-up* francesa fundada en 2010 con sede en Lyon y en San Francisco. Ofrece herramientas de modelización y de simulación de sistemas que son complejos por ser dinámicos, heterogéneos y de escalas múltiples. Desarrolla *software* destinado a problemas de energía y de desarrollo urbano. En octubre de 2013 realizó un modelo evolutivo de la ciudad de Versalles, integrando simultáneamente las dimensiones del transporte, la propiedad y el desarrollo de proyectos inmobiliarios. El objetivo no era otro que predecir el impacto a veinte años de las políticas públicas sobre la calidad de vida en la ciudad y sobre el atractivo en sus diferentes barrios. Esta herramienta, diseñada para la ciudad de Versalles, se aplicó más adelante, en diciembre de 2013, a la ciudad de San Francisco. Trabajando con el mismo tipo de datos, muy heterogéneos y detallados, a escala de barrio, ha sido posible comparar los diferentes escenarios de políticas urbanas.



THE COSMO COMPANY/ESRI

Impacto a veinte años de las decisiones políticas públicas sobre la evolución de la calidad de vida en Versalles (desde el negativo en rojo hasta el positivo en verde): los cambios no siempre se producen donde se esperaba.

innovación, que reúne a usuarios físicos y virtuales reconfigurables, una especie de avatares capaces de analizar los temas de interés para estas comunidades y de extraer de ellos peticiones cuyos resultados son reintegrados en los intercambios. De todo ello se deriva un corpus de conocimiento, dinámico, completamente inédito y que al mismo tiempo va a ofrecer una representación preliminar de estas débiles señales y permitir elaborar escenarios originales para abordar estos retos estratégicos.

EL DOMINIO DE NUEVAS HABILIDADES

El modo de gestionar los futuros retos del sector de la energía y los transportes no se basará únicamente en los desarrollos tecnológicos, sino más bien en el control de las nuevas capacidades de análisis, predicción y diseño de futuras arquitecturas (sistemas de sistemas), teniendo en cuenta, desde las fases de definición, cierta complejidad amplificada por las dimensiones sociológicas y organizativas.

En un contexto como este, la simulación de sistemas complejos (ver el ejemplo de The Cosmo Company) mediante el uso de *serious games* va a tener un lugar predominante en la definición de los futuros productos. Esta definición se basará en métodos de marketing completamente renovados, más plásticos y aptos para integrar, en mayor medida y desde sus fases iniciales, las expectativas de los usuarios. Estos nuevos sistemas de definición "imprecisa" deberán ser lo suficientemente adaptables y modificables para que los clientes se apropien de ellos, desembocando así en productos "codesarrollados". Esta es la tendencia general, guiada, entre otras cosas, por el enfoque del *design thinking*, que vuelve a introducir una parte de abstracción en el diseño de nuevos productos, inspirándose en los deseos de los usuarios, una nueva forma de cocreatividad.

Por último, la revolución digital está asociada a nuevos atributos que acarrearán consecuencias para la empresa. En su ámbito interno, cambiando radicalmente los procesos y los intercambios, principalmente a través del acceso a la información. Y fuera de la empresa, donde ya no son productos lo que se demanda, sino soluciones. Las materias primas procederán de "yacimientos" de datos (*big data*) y la ventaja competitiva procederá de la capacidad para tratarlos. Este nuevo recurso, actualmente esencial, suscitará la intrusión de actores del sector digital, como tantos otros competidores, en mercados hasta ahora reservados a la industria más tradicional. ■

por Carl Benedikt Frey

Carl Benedikt Frey es investigador en la Escuela Oxford Martin de la Universidad de Oxford y miembro del departamento de historia económica de la Universidad de Lund. Asimismo, es asesor del Comité de Habilidades Digitales de la Cámara de los Lores del Parlamento británico.



¿El fin del crecimiento económico?

Sobre cómo la economía digital puede provocar un estancamiento secular

El pasado mes de septiembre, Amazon, el gigante del comercio electrónico, adquirió Twitch, una empresa de emisión de vídeos por Internet en directo, por 970 millones de dólares. Hasta no hace mucho tiempo, la creación de una compañía de cientos de millones de euros habría sido una bendición para la generación de empleo. Sin embargo, Twitch tan solo cuenta con 170 trabajadores.

Esa historia ilustra una lección importante sobre la economía digital: al tiempo que ha generado cuantiosa riqueza para accionistas y empresarios, ha creado un escaso número de puestos de trabajo. La digitalización de la economía puede entrañar consecuencias de gran calado para el futuro del crecimiento y el empleo.

En artículos recientes sobre el estado de la economía digital, el exsecretario del Tesoro de EE.UU., Lawrence Summers, recuperó el concepto de estancamiento secular, propuesto por el economista Alvin Hansen durante la Gran Depresión. Según este, conforme se desacelera el crecimiento de la población y se reducen las innovaciones capaces de absorber capital (los desarrollos tecnológicos que crean oportunidades de inversión), la inversión cae, provocando una disminución del crecimiento económico y de la generación de empleo.

Durante el milagro económico de la posguerra, la teoría de Hansen se demostró errónea. Los avances técnicos que tuvieron lugar durante los años treinta del siglo xx y el aumento de la inversión de capital asociada a la Segunda Guerra Mundial resultaron suficientes para evitar el estancamiento. Tras ello, fue la incorporación a la fuerza de trabajo de la generación del *baby boom* la que estimuló la economía. Más tarde, en los años ochenta y noventa, se disparó la inversión en equipos informáticos y de procesamiento de información, lo que facilitó la creación de una amplia gama de puestos de trabajo enteramente nuevos relacionados con los ordenadores.

No obstante, a partir del año 2000, fecha en que tocó techo la primera oleada de inversión en tecnologías de la información, la oferta de trabajos nuevos disminuyó en EE.UU. Hansen escribió en una célebre frase que «cuando una industria novedosa [...] alcanza la madurez y deja de crecer, como siempre acaba ocurriendo, la economía al completo experimenta un estancamiento profundo [...] Y cuando un gran sector industrial nuevo pierde empuje, puede transcurrir mucho tiempo antes de que surja otro de igual magnitud». Sin empresas que creen puestos de trabajo y sustituyan a las anteriores, la economía podría estancarse.

El problema es que la mayoría de las industrias creadas a partir del año 2000 (subastas electrónicas, portales de noticias, redes sociales, servicios de emisión de vídeo y música en tiempo real por Internet, todas las cuales aparecieron por primera vez clasificadas oficialmente como industrias en 2010) contratan muchos menos trabajadores que las empresas informáticas anteriores. Mientras que en 2013 IBM y Dell contaban con 431.212 y 108.800 empleados, respectivamente, la plantilla de Facebook el pasado mes de septiembre tan solo ascendía a 8348 trabajadores.



NICK OGONOSKY

La razón por la que esos negocios generan tan poco empleo es que requieren un capital inicial escaso. Según un sondeo reciente entre 96 desarrolladores de aplicaciones para teléfonos móviles, el coste medio del desarrollo de una aplicación es de unos 5180 euros. La empresa de mensajería instantánea WhatsApp empezó con apenas 250.000 dólares; tan solo 55 trabajadores figuraban en plantilla en el momento en que Facebook anunció que la compraba por 19.000 millones de dólares. De ahí que las nuevas tecnologías hayan creado tan poco empleo a lo largo de los años 2000. La investigación que llevé a cabo en 2010 junto con Thor Berger, de la Universidad de Lund, reflejó que tan solo alrededor del 0,5 por ciento de la fuerza laboral estadounidense trabajaba para empresas que no existían en el decenio anterior.

Es probable que Summers esté en lo cierto al afirmar que las tecnologías digitales conllevan una inversión escasa y que la creciente desigualdad reduce el consumo. Con todo, mucho es lo que los Gobiernos pueden hacer para prevenir el estancamiento: por ejemplo, redistribuir la renta para favorecer a los más propensos a consumir o apoyar la inversión en industrias que crean más empleo que las digitales (puestos de trabajo para instaladores de energía solar fotovoltaica, ingenieros de energía eólica, gestores de producción de biocombustibles y expertos en planificación de transporte).

Por último, si bien las tecnologías digitales suelen crear menos empleo que otras innovaciones previas, también reducen la cantidad de dinero necesario para crear un negocio, posibilitando con ello que surjan más emprendedores. Sin duda, el autoempleo podría convertirse en norma. El desafío de la política económica es crear un entorno que recompense y promueva la asunción de riesgos que conlleva emprender. Una renta básica garantizada, por ejemplo, ayudaría a subsanar los aspectos negativos de un fracaso empresarial, a la vez que impulsaría el consumo y combatiría la desigualdad.

por Alfredo Marcos



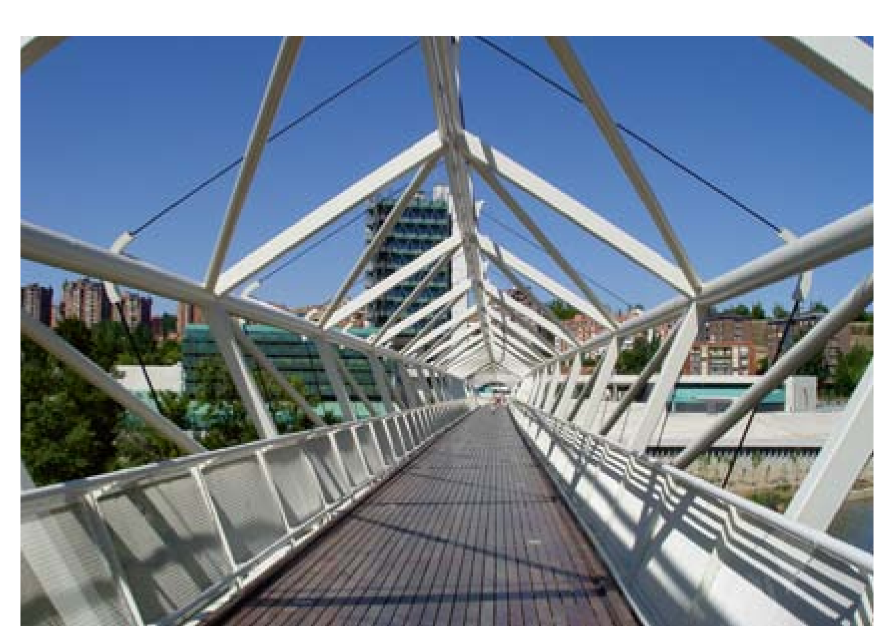
Alfredo Marcos es catedrático de filosofía de la ciencia en la Universidad de Valladolid.

Nuevas tendencias en comunicación científica

Del modelo de déficit a la participación ciudadana

El Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias (INER) es un prestigioso centro asistencial y de investigación situado en la Ciudad de México. Funciona como centro de referencia para las enfermedades respiratorias en todo México. En fecha reciente ha puesto en marcha un ambicioso proyecto de comunicación científica que se apoya en el portal www.cienciaqueserespira.org. La intención de sus promotores es comunicar al gran público sus investigaciones. Pero aquí se interpreta la comunicación científica de un modo que va más allá de la mera transmisión de información; de hecho, el lema del portal reza así: «La ciencia la hacemos todos».

El anterior es tan solo un ejemplo, pero resulta muy significativo en relación con los nuevos derroteros que está tomando la comunicación de la ciencia. Hemos pasado de una concepción unidireccional de la misma —hay que llevar la ciencia al gran público— a una voluntad de interacción y de participación ciudadana en la propia investigación. La teoría clásica según la cual la comunicación científica fluye solo en un sentido, de los científicos a la sociedad, se basa en el «modelo de déficit». Según este, la sociedad padece un déficit crónico de cultura científica que ha de ser paliado mediante la comunicación de la ciencia en términos inteligibles para el gran público. Esta visión ha sido cuestionada durante los últimos años, y en su lugar se proponen otras de carácter más sistémico, desde las cuales se contempla la comunicación científica como un proceso multidireccional. Ante la importancia de este fenómeno, la filosofía de la ciencia ha querido analizar el propio concepto de comunicación de la ciencia, así como evaluar las posibilidades reales que estas nuevas tendencias presentan.



REDES, PUENTES Y PASARELAS: Los museos científicos interactivos, como el de Valladolid (*en la imagen*), son en la actualidad una parte esencial del sistema de comunicación de la ciencia.

MUSEO DE LA CIENCIA DE VALLADOLID

Preguntémonos, pues, qué es la comunicación de la ciencia. El *DRAE* define *comunicación* como «acción y efecto de comunicar», y *comunicar*, como «hacer saber a alguien algo». Siempre que ese «algo» se refiera a la ciencia, estaremos hablando de comunicación de la ciencia. Puede haber comunicación científica en un informe de laboratorio, en un peritaje solicitado por un juez, en un artículo de prensa, en un correo electrónico o en una conversación entre investigadores, en un museo, en una clase de primaria, en un documental, en una novela o en una revista de alta divulgación. No importan el emisor, el receptor, el canal, el contexto ni la forma del mensaje. Nos hallamos, pues, ante un término sumamente general que incluye muchas modalidades.

A veces se usa una fórmula más específica: la comunicación social de la ciencia. Se trata entonces de las formas de comunicación de la ciencia cuyo receptor es la sociedad en general y no la comunidad científica. Esta fórmula excluiría, por tanto, congresos y publicaciones especializadas. Con todo, se trata de un concepto muy abarcador, que podría aplicarse incluso a la enseñanza de la ciencia en el sistema educativo. Al margen de la enseñanza propiamente dicha, que merece un análisis aparte, podemos identificar varias modalidades de comunicación social de la ciencia, que van desde la difusión hasta la investigación participativa (o ciudadana).

La difusión, o diseminación —que tomaremos como sinónimo—, de la ciencia es una forma de comunicación que pone el énfasis en el aspecto extensional. El concepto de difusión parece incluir un elemento de azar o de indiferencia respecto del receptor. La luz —ejemplo que utiliza el diccionario para definir *difusión*— se

difunde en todas las direcciones por igual. La difusión no implica una adaptación del mensaje al receptor: pone el énfasis solo en la extensión o propagación del mismo. Tanto una publicación especializada como un periódico o un museo harían, cada uno a su modo, difusión científica.

Una modalidad más exigente de comunicación es la divulgación, también llamada vulgarización o popularización. Estos términos son ya más específicos. Podemos tomarlos por cuasisinónimos. Todos hacen referencia al receptor, es decir, el vulgo, el pueblo o el público, y, en consecuencia, a la necesidad de adaptar el mensaje. Pero la sinonimia no es perfecta. Se dan en cada uno diferentes connotaciones. *Divulgación* es el término más usado en español; *popularización*, en inglés (*popular science*), y *vulgarización*, en francés (*vulgarisation des sciences*). Además, este último adquiere en español connotaciones peyorativas (degradar el saber, trivializar, rebajar el rigor), mientras que el segundo las tiene positivas (hacer popular algo). Utilizaremos, pues, en adelante *divulgación*, más neutro en nuestra lengua.

La divulgación no es un modo de comunicación cualquiera. Tiene lugar entre la comunidad científica y la sociedad, con adaptación del mensaje al receptor, que puede ser la sociedad en general o algún sector determinado de la misma. Se produce a través de los más variados medios. El cine y la literatura funcionan a veces como canales privilegiados de divulgación de la ciencia, pero también las artes plásticas e incluso las escénicas. Asimismo, los diferentes tipos de museos científicos sirven como cauce de la divulgación. Por supuesto, los libros de ensayo y las revistas —como la que el lector tiene ante sus ojos— constituyen los medios de divulgación científica por antonomasia.

Cada una de estas formas de divulgación ha desarrollado sus propios formatos, retóricas y recursos; se ha ido adaptando a los diferentes soportes disponibles, desde el papel hasta las ondas hertzianas y las redes informáticas. La aparición de Internet y, en su seno, de las redes sociales, ha permitido que la divulgación científica haya evolucionado hacia modalidades más interactivas, en las que cada agente puede ejercer funciones tanto de emisor como de receptor. Entiéndase bien: la divulgación científica nunca ha sido ajena a la interacción (las publicaciones desde antiguo incorporan secciones de correspondencia y debate). Pero, hoy en día, esta interactividad se ha intensificado extraordinariamente gracias a las nuevas tecnologías de la información y la comunicación.

La transferencia científica es también un modo importante de comunicación de la ciencia; se dirige a los sectores productivos clásicos e incluso al llamado cuarto sector. Todos ellos dependen del conocimiento tecnocientífico que se produce en los centros de investigación. Desde ahí tiene que llegar a las empresas e instituciones. Esta forma de comunicación exige obviamente una adaptación del mensaje. Dicha operación es llevada a cabo normalmente por agentes especializados, como las Oficinas de Transferencia de Resultados de la Investigación, con las que cuentan ya muchas universidades. A veces no se incluye la transferencia entre los modos de comunicación de la ciencia, a pesar de que constituye hoy en día una de las modalidades más determinantes desde el punto de vista económico y social.

Hemos de citar, además, el periodismo científico. Se trata de periodismo especializado, centrado en la ciencia, la tecnología o ambas. Sus contenidos son producidos por profesionales que utilizan las rutinas y el lenguaje periodísticos. Obedece, pues, a los objetivos, valores, intereses y *ethos* del periodismo. El periodismo científico produce, evidentemente, comunicación en todos los sentidos, no solo desde la comunidad científica hacia el gran público, sino también a la inversa. Genera, asimismo, comunicación entre la comunidad científica y los políticos o gestores. E incluso sirve a veces como nexo entre los científicos de especialidades diversas.

Es muy importante distinguir entre periodismo y divulgación. Son dos actividades distintas, entre las cuales existen solo algunas zonas de solapamiento. La primera de ellas puede producir divulgación de la ciencia, pero solo como efecto indirecto o como instrumento al servicio de fines periodísticos. La divulgación no es el objetivo propio del periodismo. Además, resulta obvio que una buena parte de la divulgación científica no es periodística (museos, libros de ensayos, ciencia ficción, documentales, etcétera), no responde a los imperativos temporales del periodismo (actualidad, novedad), ni tiene por qué estar hecha por profesionales del periodismo. En resumen, divulgación y periodismo responden a agendas distintas.

En su conjunto, las modalidades de comunicación científica que hemos explorado contribuyen al desarrollo en nuestra sociedad de una cultura científica. Deberíamos entender la ciencia como una parte importante de la cultura. Y la cultura científica como el producto o resultado de las diferentes acciones y modalidades de la comunicación de la ciencia. No es un resultado meramente pasivo o final: a mayor cultura científica, mayor demanda de comunicación de la ciencia y mayor capacidad social para satisfacer esta demanda.

Ese dinamismo ha hecho evolucionar en las últimas décadas la propia idea de cultura científica. A mediados del siglo pasado se entendía en términos de simple alfabetización científica (*scientific literacy*). De ahí hemos pasado a una idea más abarcadora, como la comprensión pública de la ciencia (*public understanding of science*). Hacia finales del siglo pasado algunos autores ya entendían la cultura científica no solo como alfabetización y comprensión, sino también como participación pública en ciencia y tecnología (*public engagement with science and technology*).

Los ciudadanos no son solo receptores pasivos de los hallazgos científicos, sino que cobran un papel activo en la conducción de las políticas científicas e incluso en la propia investigación. La participación pública en ciencia, a su vez, se presenta en distintas modalidades, que van desde la apropiación hasta la investigación participativa, en la cual los ciudadanos de a pie pueden colaborar con los científicos, como veíamos en el caso del INER. Parece evidente que el logro de una cultura científica realmente activa y participativa requiere el desarrollo de formas cada vez más interactivas de comunicación de la ciencia.

PARA SABER MÁS

Fundamentos de periodismo científico y divulgación mediática. Carlos Elías, Alianza, 2008.
Communicating science. Nicholas Russell, Cambridge University Press, 2010.
Para una comunicación crítica de la ciencia. Alfredo Marcos y José Chillón en *Artefactos*, diciembre de 2010.
Los públicos de la ciencia. Dirigido por Luis Pablo Francescutti en *Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve*, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

La cultura científica. Emilio Muñoz en *IyC*, junio de 2014.
El derecho a la ciencia. Mikel Mancisidor en *IyC*, noviembre de 2014.

SISTEMAS COMPLEJOS

Complejidad, tecnología y sociedad

La evolución técnica y social de la humanidad ha estado marcada por la necesidad de controlar un entorno de complejidad creciente. ¿A qué se debe esa tendencia? ¿Cómo está afectando a la ciencia, la educación y las formas de gobierno?

Carlos Gershenson

EN SÍNTESIS

La tecnología ha ejercido un efecto profundo sobre nuestras sociedades. Por un lado, nos permite afrontar la complejidad del entorno; por otro, también la incrementa.

Esa tendencia puede explicarse a partir de la ley de la variedad requerida, un resultado demostrado hace más de cincuenta años en el contexto de la cibernética.

La retroalimentación tecnológica ha llevado a la ciencia a un punto de inflexión. Gracias a los ordenadores, hoy resulta posible analizar fenómenos complejos.

Una ciencia de los sistemas globales permitiría manejar los retos científicos, educativos y sociales a los que se enfrentará un planeta cada vez más conectado.

CARLOS GERSHENSON

AUTOORGANIZADOS: Este mosaico (*Everybody's hive*, acrílico sobre lienzo del autor) evoca varias de las características que permiten entender nuestras sociedades desde la perspectiva de los sistemas complejos. El color de cada individuo ha sido escogido al azar, pero con la restricción de que no puede coincidir con el de ninguno de sus vecinos. Como resultado, emerge un patrón cromático que sigue reglas locales bien definidas pero cuya estructura global no puede predecirse a priori.

Carlos Gershenson dirige el departamento de ciencias de la computación del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), donde es líder del Laboratorio de Sistemas Auto-organizantes. Es también investigador asociado y miembro del consejo directivo del Centro de Ciencias de la Complejidad de la UNAM.



NUESTRAS SOCIEDADES SE HAN VUELTO CADA VEZ más complejas. Globalización, conectividad, información... son palabras que oímos con frecuencia y que reflejan ese incremento de complejidad. Nuestros sistemas económicos, sociales o culturales cada vez conectan más elementos, presentan más interacciones y operan a mayor velocidad. ¿Cómo hemos podido afrontar ese aumento de complejidad con un cerebro que, en esencia, no difiere del de nuestros ancestros paleolíticos?

Esa progresión ha sido posible gracias a la tecnología. Su efecto sobre nuestras sociedades es doble: por un lado, nos permite manejar la complejidad; pero, por otro, también la genera. ¿Hacia dónde nos lleva esta tendencia?

Para entender mejor el problema, debemos primero aclarar a qué nos referimos al hablar de complejidad. Es común oír que nuestro mundo, nuestras ciudades, el lenguaje o el cerebro son complejos. Pero ¿qué es la complejidad?

El término procede del latín *plexus*, que significa «entretejido». Algo complejo resulta difícil de desmenuzar: no podemos separar sus partes constituyentes y estudiarlas de manera aislada porque son interdependientes.

Todo sistema complejo se caracteriza por la existencia de interacciones relevantes entre sus componentes. El comportamiento del conjunto no puede predecirse sin considerar dichas interacciones, ya que estas codeterminan el estado futuro de los componentes y, por tanto, del sistema. Más aún: esas interacciones pueden generar información nueva, que no se encuentra en las condiciones iniciales ni en las de frontera, lo cual limita de manera inherente nuestra capacidad para predecir el comportamiento de un sistema complejo.

Por ejemplo, aunque conozcamos con detalle todas las propiedades de una molécula, en general no podremos predecir con exactitud cómo reaccionará con otra hasta que hagamos el experimento. Ello se debe a que no disponemos de información completa sobre sus interacciones hasta que estas tienen lugar.

Existen docenas de definiciones y medidas de complejidad. De manera intuitiva, podemos decir que la complejidad de un sistema aumenta con el número de componentes, con el número de interacciones (más interacciones entre el mismo número de componentes implican más complejidad), así como con la complejidad intrínseca a dichos componentes e interacciones.

VARIEDAD REQUERIDA

Manejar la complejidad requiere disponer de una complejidad aún mayor. Esta condición constituye una generalización de la ley de la variedad requerida, propuesta hace más de medio siglo por W. Ross Ashby en el contexto de la cibernética, el estudio científico del control y la comunicación en animales y máquinas.

La ley de la variedad requerida hace referencia a un controlador, el cual desea gobernar un sistema que puede adoptar diversas configuraciones. Para ejercer un control eficaz sobre ellas, la variedad del controlador habrá de ser mayor que la del sistema. En otras palabras, el primero deberá poseer un número de estados mayor que el segundo.

Pensemos en un brazo robótico que ha sido fabricado para manipular ciertos utensilios (pernos y tuercas, por ejemplo). Si deseamos que comience a manejar otros, su diseño deberá incorporar las eventualidades asociadas a esos nuevos elementos. Para hablar una lengua habremos de dominar sus palabras, relaciones, usos y significados. Pero, si nos proponemos hablar dos, claramente habremos de dominar una variedad lingüística mayor que la necesaria para cada idioma por separado. En general, cuanto más complejo sea un sistema (el brazo robótico o el cerebro, en los ejemplos anteriores), mayor será la complejidad a la que podrá hacer frente.

Como aplicación de este principio, en nuestro grupo de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) hemos desarrollado un sistema de semáforos que se autoorganiza y adapta su complejidad a la del flujo vehicular. Los métodos tradicionales tratan la regulación del tráfico como un problema de optimización: intentan maximizar el flujo para una densidad de vehículos determinada. Sin embargo, el tráfico constituye un sistema complejo que cambia de manera constante, por lo que su control debe verse más como un problema de adaptación que como uno de optimización. Al incorporar la complejidad requerida, nuestro sistema de semáforos consigue reducir a la mitad el tiempo de espera de los vehículos.

Por sí mismo, nuestro cerebro solo puede hacer frente a una variedad y complejidad finitas, similares a la del entorno en que evolucionaron nuestros ancestros. Por eso estamos acostumbrados a pensar de manera «reduccionista», ya que nuestras facultades cognitivas no nos permiten considerar más que unas pocas variables al mismo tiempo.

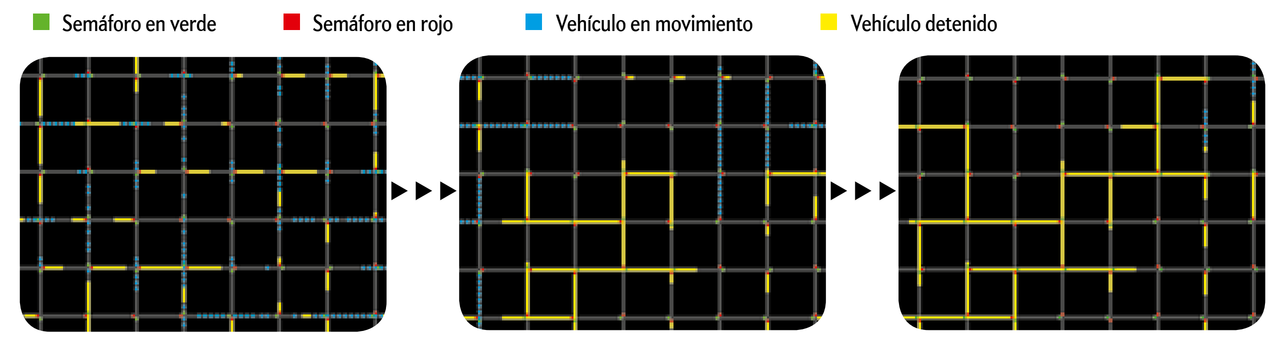
Hasta ahora, nuestra ciencia ha sido principalmente reduccionista: simplifica y aísla para poder predecir. Este método, iniciado en tiempos de Galileo, Newton, Laplace y Descartes, ha rendido unos frutos extraordinarios. En medicina ha duplicado la esperanza de vida en todo el mundo durante el último siglo, al iden-

Ventajas de la autoorganización

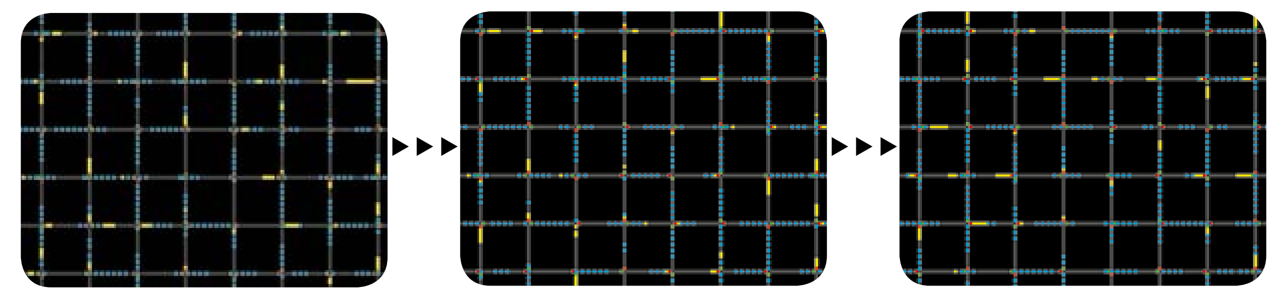
Una ley básica de la cibernética establece que cualquier «controlador» debe disponer de una complejidad mayor que la del sistema que desea gobernar; en caso contrario, el primero no podrá responder de forma adecuada a todas las configuraciones posibles del segundo. La aplicación de dicho principio permitiría mejorar la eficiencia de numerosos sistemas complejos presentes en las sociedades modernas.

Un ejemplo sencillo lo hallamos en el tráfico rodado. El flujo de vehículos en una ciudad conforma un sistema interconectado cuyo grado de complejidad cambia constantemente. Según muestran las simulaciones llevadas a cabo por el equipo del autor, un sistema de semáforos que se adaptase en cada momento a la complejidad del tráfico reduciría de manera considerable el tiempo de espera medio de los vehículos. Las imágenes inferiores muestran las diferencias entre este método (*abajo*) y la manera tradicional de regular el tráfico (*arriba*).

Semáforo en verde — Semáforo en rojo — Vehículo en movimiento — Vehículo detenido



Enfoque tradicional basado en la optimización: Control centralizado
Las formas más habituales de regular el tráfico se basan en métodos centralizados: se intenta predecir el flujo promedio de los vehículos y, a partir de ese dato, se diseña un sistema de semáforos que minimice los tiempos de espera. Sin embargo, el número de automóviles que llegan a un cruce es casi siempre mayor o menor de lo esperado. Si el sistema no puede adaptarse a esos cambios, se producirán atascos y retrasos. En esta simulación, los semáforos acaban dando vía libre a calles que no tienen tránsito (*derecha*), una situación común en ciudades como México DF.



Nuevo enfoque basado en la adaptación: Control emergente
Un método alternativo consiste en permitir que cada semáforo tome sus propias decisiones de manera local. Un conjunto de sensores puede contar el número de vehículos que se acercan a un semáforo en rojo y dar la orden de cambiar a verde antes de que se acumulen demasiados. Junto con otras reglas simples, el sistema dará así preferencia a las calles con mayor demanda. Como resultado, el tráfico se autoorganiza de manera similar a como lo hace una bandada de pájaros: adaptándose a los cambios por medio de interacciones locales. Ello genera un flujo continuo y evita los cuellos de botella.

CORTESÍA DEL AUTOR

tificar y eliminar las causas de un gran número de enfermedades infecciosas. Se ha reducido considerablemente el hambre. Se han desarrollado ordenadores y formas de comunicación que han revolucionado nuestra cultura.

Sin embargo, dicho enfoque tiene sus límites. Hoy en día, la mayoría de las muertes en los países desarrollados se deben a enfermedades crónicas y degenerativas como el cáncer, la diabetes o los trastornos cardiovasculares. Se trata de enfermedades complejas, con múltiples causas y por lo tanto sin una única cura. No tenemos una idea clara de nuestro impacto sobre el medio natural. Tampoco sabemos cómo manejar una economía globalizada, determinada por un sinfín de actores interdependientes.

Por un lado, la complejidad de nuestro entorno ha aumentado gracias a los avances científicos y técnicos. Por otro, la tecnología encierra el potencial para manejar dicha complejidad.

HOMO TECHNICUS

De manera general, llamaremos *tecnología* al conjunto de herramientas y habilidades usadas con cierto propósito. Entre otras muchas, eso incluye ordenadores, automóviles, teléfonos, libros, armas, medicamentos y lenguas. La nuestra no es la única especie creadora de tecnología. Algunos primates, delfines y cuervos han desarrollado herramientas con distintos propósitos. Sin embargo, hasta el momento somos la especie que ha generado

la tecnología más compleja y con mayor impacto sobre el entorno.

Desde un punto de vista biológico casi no nos diferenciamos de nuestros ancestros paleolíticos, cuya tecnología incluía fuego, ropa, armas y útiles de piedra, madera o hueso. Hoy, sin embargo, la tecnología nos permite realizar tareas mucho más complejas que las que podían llevar a cabo nuestros antepasados con el mismo cerebro. Jamás podríamos comunicarnos al instante ni transportarnos a otros continentes sin ayuda de nuestros artefactos. Ese espectacular aumento en nuestra capacidad para controlar y transformar el entorno ha sido posible gracias a la tecnología, más que a la evolución biológica.

Podemos decir que la tecnología ha aumentado nuestras facultades cognitivas. Como ha defendido el filósofo de la Universidad de Edimburgo Andy Clark, nuestros artefactos funcionan como una «mente extendida», ya que ejecutan tareas que antes llevábamos a cabo exclusivamente en el cerebro. Pero la tecnología va más allá: actúa como una especie de «muleta mental» que nos permite llegar mucho más lejos que nuestro cerebro. Por ejemplo, hoy ya resulta imposible memorizar toda la información que almacenamos en nuestros teléfonos celulares.

La tecnología no solo ha aumentado nuestra capacidad para manejar conceptos cada vez más complejos. También ha incrementado la complejidad de nuestras interacciones. La tecnología influye y determina de manera esencial nuestro comportamiento. Se ha convertido en un aspecto clave de lo que nos define como humanos.

MOTOR SOCIAL

A lo largo de la historia la tecnología ha ejercido una influencia clave sobre nuestras sociedades. El desarrollo de la agricultura permitió la transición de un estilo de vida nómada a otro sedentario. Al disponer de fuentes de alimento abundantes y relativamente seguras, las poblaciones crecieron y se fundaron las primeras ciudades. Ello aumentó el tamaño de las comunidades, lo que a su vez contribuyó a incrementar su complejidad.

Para hacer frente a dicha complejidad, se desarrollaron acueductos, murallas, sistemas de drenaje y de transporte. Todo ello propició la aparición de nuevas profesiones, lo que fomentó la especialización entre los miembros de la sociedad. Para intercambiar productos se inventó el dinero, que media entre todas las transacciones comerciales posibles.

El desarrollo tecnológico de la Revolución Industrial fomentó aún más la migración hacia las ciudades —con efectos positivos y negativos—, trajo consigo la fabricación en masa, promovió la educación universal y generó nuevas clases sociales, organizaciones e ideales.

El siglo XIX conoció la posibilidad de transmitir información al instante a través de los océanos. La red de telégrafos se comparó con un «sistema nervioso planetario». Más tarde, el cine, la radio y la televisión hicieron posible la propagación masiva de información, con el potencial de llegar a millones de personas.

Los cambios sociales se están acelerando a un ritmo sin precedentes. ¿Qué nos espera?

Los primeros ordenadores llegaron a mediados del siglo XX. Su producción se masificó en la década de los ochenta. En los años noventa, la popularización de Internet no solo permitió transmitir ingentes cantidades de información, sino que brindó a los usuarios la posibilidad de crear su propio contenido. Hoy vivimos una transición hacia un escenario en el que la mayoría de las personas no solo serán consumidoras pasivas de información, sino también productoras. Se estima que cada día generamos el equivalente a 36 millones de libros en correos electrónicos, blogs y redes sociales.

La tecnología no solo ha contribuido a aumentar la complejidad de los individuos, sino también la de los grupos sociales, al coordinar y potenciar las interacciones entre personas. Ha llegado incluso a incrementar la complejidad del planeta como un todo, puesto que ha aumentado las interacciones entre las especies animales y vegetales de distintas partes del mundo.

UNA NUEVA CIENCIA

La tecnología ha afectado de manera considerable al desarrollo de la ciencia. Así como el telescopio y el microscopio nos permitieron estudiar una gran cantidad de fenómenos astronómicos y biológicos, la llegada de los ordenadores nos ha brindado por primera vez la posibilidad de investigar fenómenos complejos, desde el comportamiento colectivo de una bandada de pájaros hasta el funcionamiento del cerebro. Antes eso era inviable, ya que no contábamos con la complejidad requerida para analizar miles de variables interdependientes.

Al facilitar las interacciones sociales, la tecnología también ha acelerado la colaboración entre investigadores mediante el uso del correo electrónico, videoconferencias o repositorios compartidos. El acceso a códigos abiertos, bases de datos y publicaciones permite que cada vez más investigadores tengan contacto con conocimientos de todo tipo.

Un ejemplo lo hallamos en el sitio arxiv.org, donde los autores comparten manuscritos en su fase inicial. Aunque se trata de versiones preliminares, su acceso facilita la retroalimentación y propagación del conocimiento sin necesidad de esperar a los tiempos de publicación de las revistas especializadas. Los artículos de alto impacto se difunden con rapidez a través de las redes sociales, lo que acelera aún más las interacciones con potencial para generar nuevo conocimiento.

La tecnología también ha hecho posible que la población general participe en el proceso científico, el fenómeno conocido como ciencia ciudadana. En la web fold.it, por ejemplo, los usuarios juegan a plegar proteínas; una tarea sencilla que, sin embargo, ayuda a los científicos a abordar tareas que los ordenadores todavía no pueden resolver.

Nuestros dispositivos generan cada vez más datos. Según IBM, el 90 por ciento de los datos almacenados en todo el mundo en 2013 se habían creado durante los dos años anteriores. Eso quiere decir que, desde el inicio de la escritura hasta 2011, la humanidad produjo nueve veces menos datos que entre 2011 y 2013.

Por supuesto, no resulta nada trivial encontrar significado en tales cantidades de información. Con todo, el análisis de las pautas generales presentes en los macrodatos (*big data*) está permitiendo contrastar teorías en ciencias sociales, las cuales tenían que conformarse hasta hace poco con métodos discursivos por falta de datos. La tecnología nos está permi-

tiendo describir, modelizar, entender y, hasta cierto punto, controlar mejor los fenómenos sociales.

Por ejemplo, hoy resulta posible analizar patrones sociales a partir de los datos de teléfonos móviles o de la actividad en Twitter. Hace unos años, Google digitalizó cerca del 4 por ciento de todos los libros publicados a lo largo de la historia. Ello ha permitido estudiar la evolución de las culturas y los idiomas con enormes cantidades de datos: un nuevo campo que los investigadores de Harvard Jean-Baptiste Michel y Erez Liberman Aiden han denominado *culturómica*. No solo estamos obteniendo información cuantitativa sobre la cultura, sino sobre cómo ha cambiado esta a través de los siglos. Podemos decir que la tecnología nos está acercando más a encontrar las «leyes» de los fenómenos sociales.

La ciencia también se ha vuelto más «democrática», en el sentido de que la tecnología permite una mayor participación tanto en la recepción como en la generación de conocimiento, con el potencial de reducir las brechas sociales generadas por el dominio del conocimiento por parte de una minoría.

EDUCACIÓN

Nunca antes habíamos tenido tanto conocimiento tan disponible. Wikipedia constituye un claro ejemplo del poder de la colaboración a la hora de generar conocimiento. En poco tiempo se ha convertido en la enciclopedia con mayor cobertura de la historia, al facilitar que miles de personas escriban, corrijan y actualicen artículos. De nuevo, no solo se permite el acceso al conocimiento, sino que se facilita su generación y refinación.

La tecnología posee el potencial de solucionar muchos de los problemas que aquejan a la educación en todos sus niveles. En general, nos está permitiendo incrementar la complejidad de los sistemas educativos, la cual ha de ser mucho mayor que la de los mejores docentes para poder hacer frente a la complejidad de la comunidad actual de estudiantes [*véase* «La educación en la era digital», por VV.AA.; Informe especial en Investigación y Ciencia, septiembre de 2013].

Desde hace un tiempo, los cursos abiertos masivos en línea (MOOC, por sus siglas en inglés) han demostrado el potencial de la tecnología para facilitar el proceso educativo a millones de estudiantes. Hace un año tuve la oportunidad de impartir un curso masivo sobre pensamiento científico en la plataforma Coursera (https://www.coursera.org/course/ciencia) que contó con más de 20.000 alumnos en la primera edición y más de 25.000 en la segunda. El éxito de los MOOC no solo se encuentra en los vídeos que cada estudiante puede estudiar y repasar a su ritmo, sino en la retroalimentación que se crea en los foros y en las evaluaciones entre compañeros, la cual resulta más compleja y personalizada que la que podrían lograr los mejores docentes con grupos pequeños.

Cuanta más tecnología se desarrolle para mejorar la educación, más personalizados y adaptativos podrán ser los procesos de aprendizaje, que podrán liberarse de unos programas excesivamente rígidos y orientarse más hacia los intereses particulares de cada estudiante. Esa misma flexibilidad también puede aplicarse a otros sistemas, como los que usamos para regir nuestras sociedades.

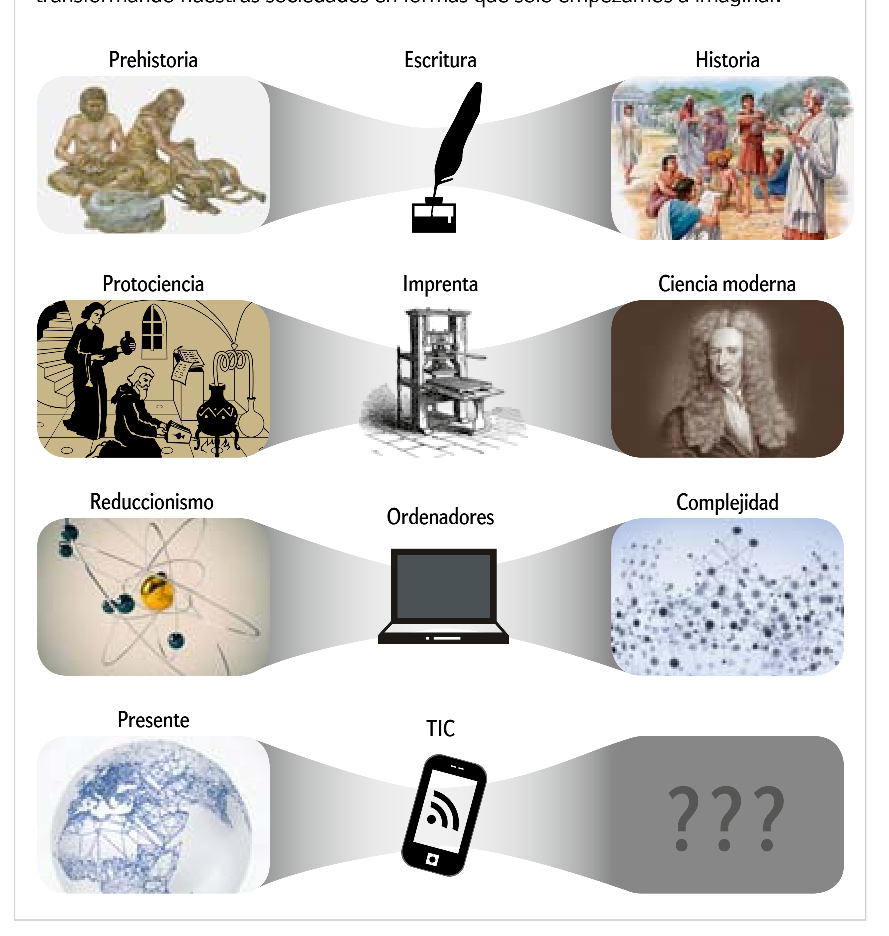
GOBIERNO Y BUROCRACIA

Nuestra tecnología deja una huella digital. Esa información, que generan tanto sociedades como Gobiernos, puede explotarse para mejorar el funcionamiento de ciudades, organizaciones y burocracias. Por un lado, permite detectar y ajustar de manera automática retrasos y cuellos de botella en los flujos de información. Por otro, hace posible detectar la responsabilidad de distintos actores, lo que fomenta su buen

TECNOLOGÍA Y CAMBIO SOCIAL

Cibernética del conocimiento

La tecnología ha transformado nuestras sociedades mucho más que la evolución biológica. La escritura facilitó la preservación de la información y, con ello, la transmisión del saber de una generación a las siguientes. La llegada de la imprenta a Europa permitió la rápida propagación del conocimiento, lo que espoleó el desarrollo de la ciencia moderna. Los ordenadores están generando un cambio el paradigma científico dominante, al permitirnos estudiar sistemas complejos con millones de componentes e interacciones. Las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) están transformando nuestras sociedades en formas que solo empezamos a imaginar.



funcionamiento y, potencialmente, inhibe la corrupción.

Hace unos años, nuestro grupo desarrolló modelos de burocracias con capacidad de autoorganizarse. Una burocracia puede entenderse como una red en la que varios agentes deben comunicarse entre sí para llevar a cabo sus respectivas tareas. Comprobamos que, si a la estructura de la red se le permitía un ligero grado de adaptabilidad a las circunstancias de trabajo en cada momento (algo factible con medios electrónicos y firmas digitales), su eficiencia aumentaba de manera considerable.

En esa dirección, varios órganos de gobierno de distintos niveles han comenzado a adoptar prácticas de «datos abiertos» (*open data*). Al permitir el acceso a datos socioeconómicos, geográficos, sanitarios o de gasto público, aumenta la transparencia y la confianza que los ciudadanos depositan en sus instituciones. Al mismo tiempo, se fomenta la participación ciudadana en la captura y generación de información. De esta manera, los Gobiernos no solo ofrecen datos, sino que reciben muchos más de los que podrían conseguir por sus propios medios.

En Boston, la aplicación para teléfonos inteligentes Street Bump detecta baches en las calles a partir de los datos que recibe de los acelerómetros del teléfono cuando el usuario viaja en automóvil; después, envía esa información al Ayuntamiento. Otras aplicaciones integran información sobre el transporte en distintas ciudades y sugieren rutas a los usuarios. Desde hace un tiempo, nuestro grupo de la UNAM participa en un esfuerzo similar para mejorar la movilidad en Ciudad de México a través de la iniciativa www.livingmobs.com. Esta formó parte de una propuesta con la que, el año pasado, nuestro equipo ganó el premio Audi Urban Future 2014.

La tecnología no solo facilita que los ciudadanos participen en el uso y la generación de datos abiertos. Al igual que ocurre con la ciencia ciudadana, nuestras sociedades pueden funcionar de un modo más democrático y fomentar la participación de amplios sectores de la población en las decisiones políticas. Por supuesto, no resulta trivial que los Gobiernos estén dispuestos a ceder parte de su poder. Sin embargo, los ciudadanos que han logrado presionar a sus políticos en esta dirección, como ocurrió en Islandia entre 2009 y 2011, han mostrado las ventajas para todos de este enfoque.

Aunque algunas novelas futuristas han presentado la tecnología como una herramienta del autoritarismo, está en nuestras manos encauzar su potencial hacia el beneficio común, y no hacia el de unos cuantos a costa de la mayoría.

¿Hacia una eudemonía?

Cada vez generamos más información. Nuestros sistemas sociotécnicos incluyen cada vez más componentes y más interacciones. Los cambios sociales se están acelerando a un ritmo sin precedentes. ¿Qué nos espera?

En ocasiones, un mayor número de componentes contribuye a incrementar la robustez del sistema, puesto que, si un elemento falla, otros pueden tomar su lugar. Sin embargo, el aumento de las interacciones puede hacer que el sistema se torne más frágil, ya que provoca que los cambios se propaguen con rapidez.

Durante la Edad Media, la peste bubónica se extendió en forma de oleadas infecciosas durante años. Las epidemias actuales se propagan globalmente en días. Otro ejemplo del mismo fenómeno sucedió el 6 de mayo de 2010 en la Bolsa de Nueva York, cuando las transacciones automáticas provocaron el llamado *flash crash* de las 14:45. Aunque se han ofrecido varias explicaciones, nadie sabe a ciencia cierta qué fue lo que causó que el índice Dow Jones perdiese en unos instantes el 7 por ciento de su valor (la mayor caída de esas características de su historia) y recuperarse buena parte de las pérdidas pocos minutos después.

Casos como los anteriores demuestran que necesitamos con urgencia una ciencia de los sistemas globales. Este esfuerzo ha reunido a cientos de científicos en el ambicioso proyecto FuturICT, liderado por el físico Dirk Helbing, de la Escuela Politécnica de Zúrich. Su objetivo consiste en desarrollar la ciencia y la tecnología necesarias para entender, modelizar y regular sistemas sociotécnicos a escala global en ámbitos como economía, educación, salud, ciencia, toma de decisiones, innovación, medio ambiente o urbanismo, entre otros [*véase* «Simular el planeta en tiempo real», por David Weinberger; Investigación y Ciencia, febrero de 2012].

Al igual que otros proyectos similares, FuturICT no pretende predecir y controlar de manera absoluta los sistemas sociotécnicos, ya que su complejidad limita de manera inherente nuestra capacidad predictiva. Lo que sí persigue es entender mejor la complejidad de nuestro entorno, con el objetivo de poder hacerle frente de la manera más adecuada. Por supuesto, ello no evitará los problemas y las catástrofes, pero sí contribuirá a que estemos mejor preparados para reaccionar cuando se presenten.

¿Qué otros efectos ejercerá la tecnología sobre nuestras sociedades? ¿Seguirá aumentando su complejidad de manera indefinida, o nos encontraremos con un límite? Y, si hay uno, ¿dónde está?

Al respecto se han propuesto varios escenarios futuristas. Los más optimistas vaticinan una eudemonía, una sociedad en la que todos alcanzan la felicidad gracias la tecnología. Los más pesimistas la ven como causa de un apocalipsis para nuestra especie, nuestro planeta o ambos. No cabe duda de que la tecnología goza de un potencial enorme, pero lo que finalmente determinará cuán cerca nos encontremos de uno de esos extremos será el uso que hagamos de ella. En último término, el futuro dependerá de nosotros, no de la tecnología.

PARA SABER MÁS

Natural-born cyborgs: Minds, technologies, and the future of human intelligence. Andy Clark. Oxford University Press, 2003.

Self-organizing traffic lights. Carlos Gershenson en *Complex Systems*, n.º 16, págs. 29-53, 2005. Disponible en **www.complex-systems.com/pdf/16-1-2.pdf**

Design and control of self-organizing systems. Carlos Gershenson. CopIt Arxives, Mexico, 2007. Disponible en **tinyurl.com/DCSOS2007**

Smartocracy: Social networks for collective decision making. Marko A. Rodriguez et al. en *Hawaii International Conference on Systems Science*. IEEE Computer Society, 2007.

Towards self-organizing bureaucracies. Carlos Gershenson en *International Journal of Public Information Systems*, vol. 4, n.º 1, 2008. Disponible en **www.ijpis.net/ojs/index.php/IJPIS/article/view/51**

¿Cómo hablar de complejidad? Carlos Gershenson en *Llengua, Societat i Comunicació*, n.º 11, págs. 14-19, 2013. Disponible en **revistes.ub.edu/index.php/LSC/article/view/5682**

EN NUESTRO ARCHIVO

Comprender la complejidad. Geoffrey B. West en *IyC*, julio de 2013.

La era de los macrodatos. Informe especial. VV. AA. en *IyC*, enero de 2014.

La era de la informática universal. Gershon Dublon y Joseph A. Paradiso en *IyC*, septiembre de 2014.



UN ANIMAL DEL TAMAÑO DE UN ROEDOR que vivió hace unos 65 millones de años es el ancestro de los mamíferos placentarios actuales. Aunque su fósil no se ha descubierto aún, el ilustrador Carl Buell ha utilizado una matriz de datos fenómicos y genómicos procedentes de mamíferos extintos y actuales para representar las almohadillas plantares, los bigotes, la cola, la postura y la alimentación de este antepasado remoto.

Maureen A. O'Leary es profesora de anatomía en la facultad de medicina de la Universidad Stony Brook, en Nueva York. Investiga la filogenia de los vertebrados, en particular, de los mamíferos, y dirige el proyecto de investigación filogenética MorphoBank.



EVOLUCIÓN

Los primeros mamíferos placentarios

Un conjunto de datos genéticos, fenotípicos y paleontológicos sustentan la aparición y rápida diversificación de este grupo hace 65 millones de años

Maureen A. O'Leary

Cuando contemplamos las innumerables formas de vida que nos rodean es fácil olvidar que las especies vivientes representan una ínfima parte de la historia de la vida. Casi todos los cálculos cifran en el 99 por ciento las especies desaparecidas de la faz de la Tierra.

Charles Darwin y Alfred Russel Wallace nos legaron una teoría de la evolución en que las especies descienden de un ancestro común y que explica, con elegante simplicidad, la diversidad y la similitud entre las formas de vida del planeta. Lo que ambos visionarios no pudieron acometer, por imposibilidad material en su época, fue el trazado de las líneas genealógicas de las especies, que conforman el árbol filogenético o árbol de la vida.

La tarea de descifrar su frondoso ramaje, con las miríadas de especies vivientes (los cálculos hablan de entre 4 y 100 millones) y las decenas de miles de fósiles, ha mantenido ocupadas a varias generaciones de científicos. Solo en nuestra clase zoológica, la de los mamíferos (*Mammalia*), el número de especies descubiertas supera las 5000 vivientes y las 10.000 extintas. Desde el punto de vista paleontológico, no está nada mal: los mamíferos pueden presumir de un registro fósil bastante bueno, que, además, contiene importantes especies de transición temprana.

EN SÍNTESIS

Dibujar el árbol de la vida de los mamíferos placentarios supone un enorme reto, el cual se está empezando a abordar gracias a los nuevos instrumentos para el estudio de la anatomía de las especies presentes y pasadas, los métodos algorítmicos modernos y las vastas bases de datos genómicas.

Para integrar estos distintos datos se ha desarrollado una aplicación de acceso abierto, MorphoBank, con la que es posible organizar, corregir e ilustrar la vasta información publicada sobre los caracteres de los mamíferos.

El análisis de los datos sostiene la hipótesis planteada por el equipo de la autora sobre la evolución de los mamíferos placentarios, que habrían surgido a finales del Cretácico, hace 65 millones de años, y se habrían diversificado con rapidez.

CORTESÍA DEL PROYECTO DEL ÁRBOL DE LA VIDA DE LOS MAMÍFEROS (*ilustración*); ©AMNH/R. MICKENS (*M. A. O'Leary*)

Ahora estamos empezando a abordar este gran reto —para la vida en general y los mamíferos en particular—, gracias a los nuevos instrumentos para el estudio de la anatomía de las especies presentes y pasadas, a los métodos algorítmicos modernos y a las vastas bases de datos genómicas. El objetivo es dibujar el árbol filogenético de todas las especies vivientes y extintas, el cual proporcionará un sólido apoyo para las reconstrucciones del pasado.

¿POR QUÉ ESTUDIAR EL ÁRBOL DE LA VIDA?

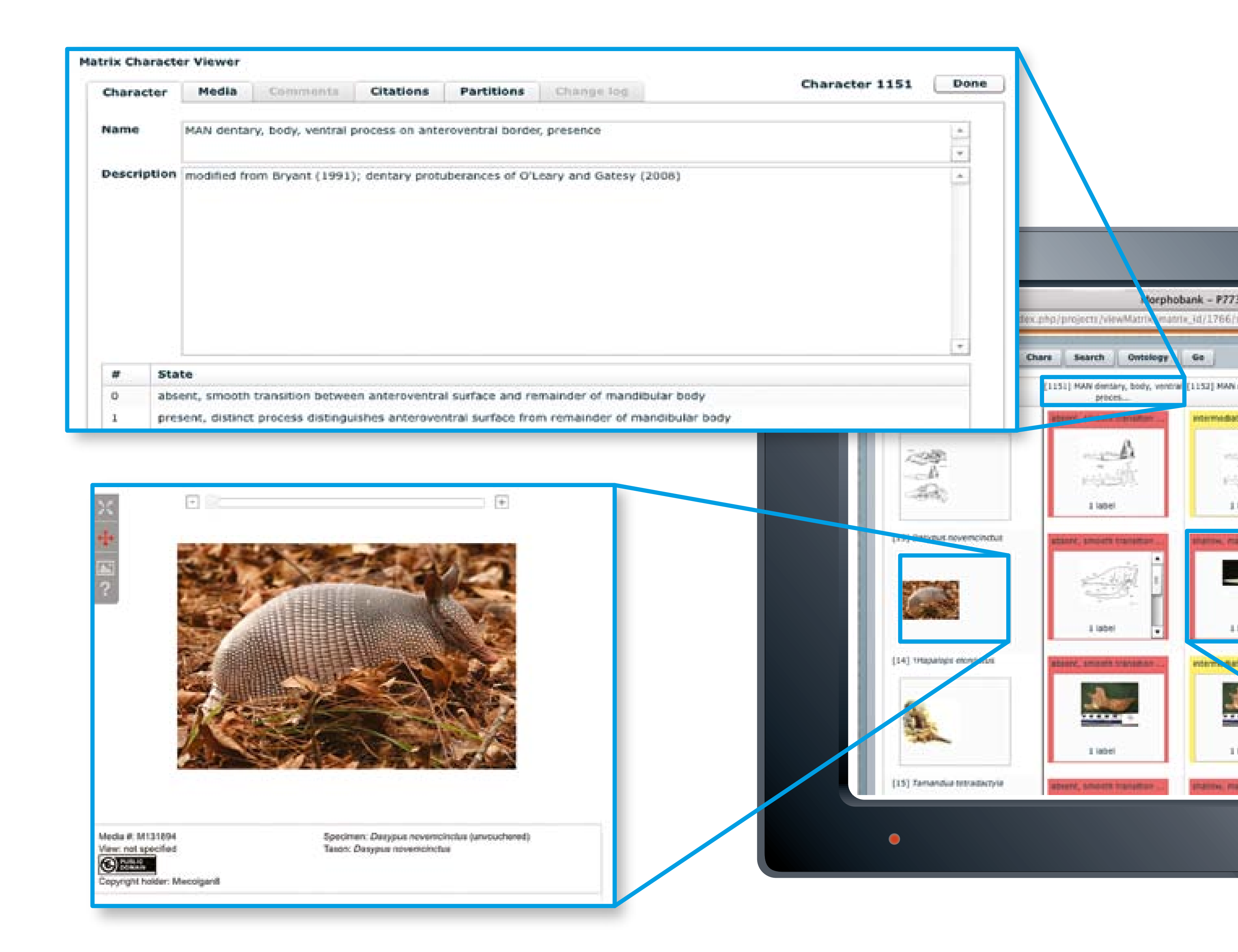
Los nuevos programas informáticos permiten trabajar a investigadores de centros muy distantes como un equipo virtual y, además, ofrecen nuevos medios para organizar los datos fenómicos (el conjunto de caracteres no genómicos de un ser vivo) a gran escala. A la cabeza de estas transformaciones se sitúa el proyecto del Árbol de la Vida de los mamíferos, una iniciativa financiada por la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU. en la que participará un gran número de expertos durante años.

Trazar un boceto prolijo de los linajes de los mamíferos placentarios, actuales y extintos, nos permitirá interpretar la evolución de los caracteres biológicos. Con el árbol abordaremos preguntas intrigantes como: ¿modificaron los cetáceos su alimentación antes o después de perder las extremidades y abandonar para siempre la tierra firme? O bien, otra cuestión más relacionada con el origen humano: ¿son los roedores tan antiguos como los primates?

Dibujar el árbol de la vida de los mamíferos es una empresa que demanda el concurso de un nutrido grupo de especialistas. El equipo de fenómica mamífera del que formo parte está integrado por otros 22 científicos y doctorandos. La escala de nuestra tarea no tiene paralelo: la mayoría de los estudios precedentes han abordado un número diez veces menor de caracteres y no han dejado imágenes o datos en línea a disposición de los científicos y del público. Emprendemos el proyecto con una nueva aplicación web llamada MorphoBank con la que será posible organizar, corregir e ilustrar la información publicada sobre los caracteres mamíferos. Nuestro equipo ha recopilado observaciones antiguas y modernas sobre más de 4000 rasgos fenómicos del esqueleto, la dentición y las partes blandas, así como del desarrollo y el comportamiento.

Al inicio del proyecto, los integrantes del equipo (dos docenas de personas de cinco nacionalidades) celebramos un encuentro presencial para reunir todas las publicaciones pretéritas, las cuales contenían los nombres de los rasgos y describían las características de las especies. La comparación de los datos de esas publicaciones no resulta fácil porque los científicos raramente

SIGMA XI/AMERICAN SCIENTIST



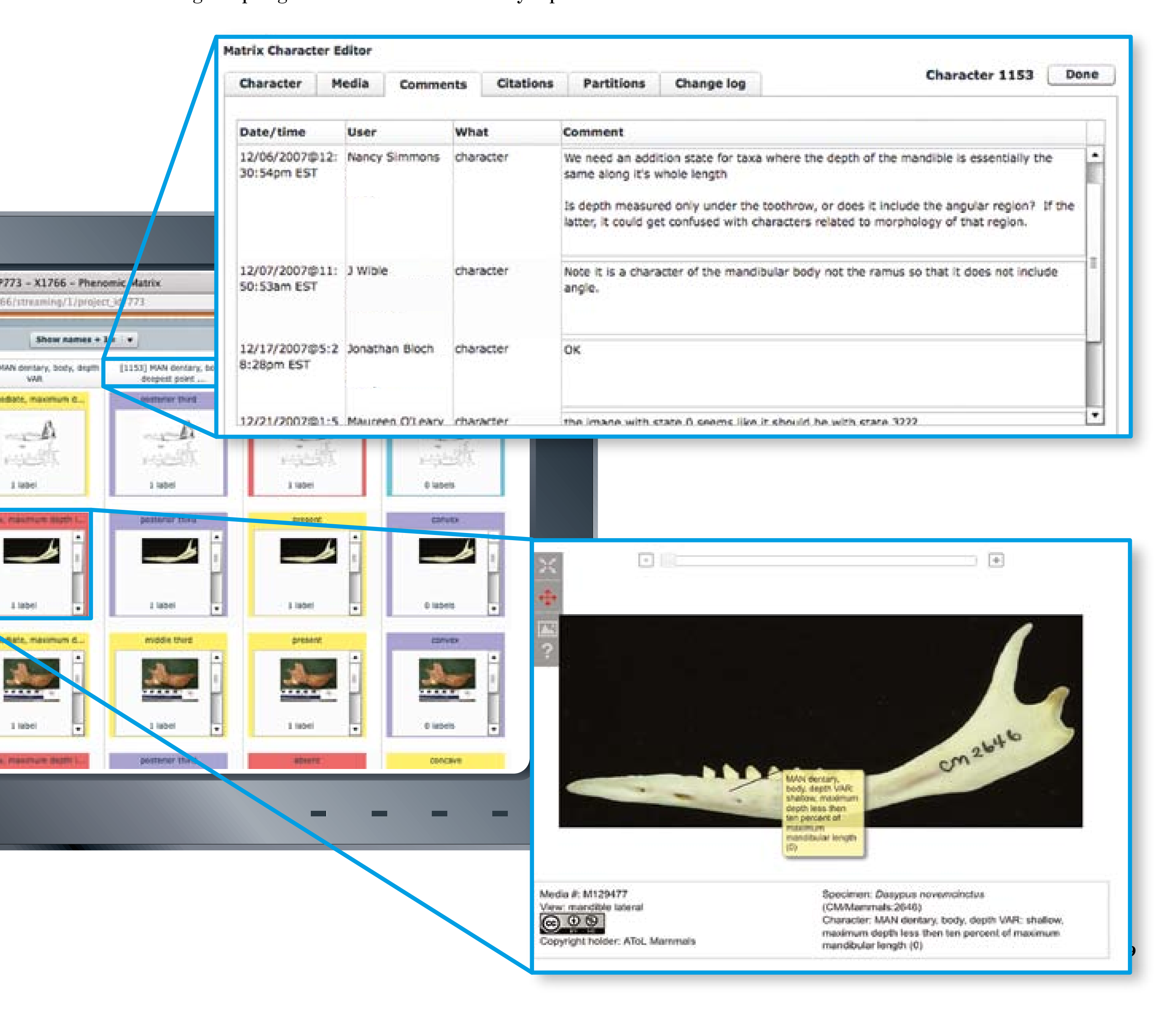
definen los caracteres de la misma manera. Combinar varias hojas de cálculo o matrices se convierte, por consiguiente, en una tarea ardua. Además, dado que numerosos rasgos solo habían sido estudiados en un subconjunto de especies, necesitábamos conocer las condiciones de otras semejantes.

La creación de una base de datos fenómicos ha comenzado a recibir apoyo tan solo hace poco; tales datos han sido mucho más difíciles de organizar que los genómicos, y también ha supuesto un mayor esfuerzo cuantificarlos, documentarlos y compartirlos en línea. La clasificación de los rasgos tiende a una mayor complejidad; se centra más en la descripción y en las imágenes, a diferencia de las secuencias de genes, que son inherentemente digitales (consisten solo en A, C, T, y G), y, además, suele emplearse una terminología muy específica. Replicar y corroborar el trabajo de otros colegas —una parte fundamental del trabajo científico— ha conllevado sus propias dificultades. Hay pocos estudios filogenéticos basados en el fenoma que hayan sido incluidos en bases de datos, y aún son menos los que han aportado imágenes que muestren exactamente lo que se entiende por un rasgo concreto.

Durante cinco años, el equipo responsable de los datos fenómicos hemos trabajado en un entorno en línea para debatir sobre la terminología anatómica e intercambiar imágenes, acompañadas de una leyenda para aclarar a qué nos referíamos. Día a día, con cada discusión y cada nueva imagen fuimos construyendo un almacén en línea de conocimientos anatómicos. Estos datos se combinaron después con los genéticos para crear una supermatriz, una enorme matriz de matrices.

En un siguiente paso, a partir de los datos ejecutamos varios algoritmos para construir un árbol filogenético. Tales algoritmos utilizan la capacidad de las computadoras actuales para buscar con rapidez el árbol óptimo entre un inmenso número de posibilidades, además de calcular su longitud relativa. De este modo, un algoritmo de parsimonia buscaría el árbol más corto posible, aquel que podría explicar todos los rasgos observados con la menor cantidad de pasos posibles. El que

LA PÁGINA WEB DE MORPHOBANK reúne un volumen ingente de datos publicados e inéditos acerca de los caracteres fenómicos de los mamíferos en un formato de hoja de cálculo enciclopédica. A través de imágenes digitales ampliables, referencias bibliográficas y notas aclaratorias sobre las controversias científicas, MorphoBank es la primera matriz en línea de su tipo que hace accesibles los datos e imágenes por igual a la comunidad científica y al público.



obtuvimos mediante este procedimiento, que publicamos en 2013 en *Science*, difería poco de los generados mediante métodos estadísticos. Aunque restringe nuestras hipótesis sobre el momento en que se originó un grupo, también puede reflejar los diferentes escenarios que describen la antigüedad de los distintos grupos taxonómicos que hay en él. Las numerosas especies fósiles incluidas se convierten en puntos de referencia que permiten determinar cómo encaja el árbol en el registro estratigráfico.

Por medio de los llamados «linajes fantasma», los especialistas en filogenia pueden afirmar que un grupo apareció como mínimo una vez. El razonamiento es el siguiente: si dos especies son cercanas, ambas tuvieron que coexistir en el momento en que se separaron. Si las dos aparecen en el registro fósil en dos lapsos de tiempo distintos, se deduce que la edad de ambas se corresponde, como mínimo, con la más antigua de ellas. El concepto de linajes fantasma combina, pues, la cronología y la topología en el árbol para determinar la antigüedad mínima de especies estrechamente emparentadas.

El análisis del linaje fantasma nos lleva a suponer que la rama de los mamíferos placentarios surgió antes de la gran extinción del Cretácico-Paleógeno (K-Pg). Este cataclismo se produjo hace poco más de 65 millones de años y coincidió con un vulcanismo intenso, el impacto de un asteroide y la célebre extinción de los dinosaurios. Lo que no es tan conocido acerca del evento K-Pg es que su impacto no se limitó ni mucho menos a los dinosaurios: cerca del 75 por ciento de las especies del planeta desapareció. Nuestra hipótesis encaja en el modelo explosivo de evolución de los mamíferos placentarios, el cual sostiene que los linajes placentarios brotaron a finales del período Cretácico, o a continuación de este, y se diversificaron con rapidez.

A algunos investigadores les gusta reconstruir modelos de evolución génica o emplear índices de preservación fósil, con los que se obtienen dataciones muy anteriores a las que ofrece el registro fósil. El examen de esos modelos, que describen acontecimientos pasados irrepetibles, solo es posible si los datos se contrastan con nuevos descubrimientos empíricos (esto es, paleontológicos).

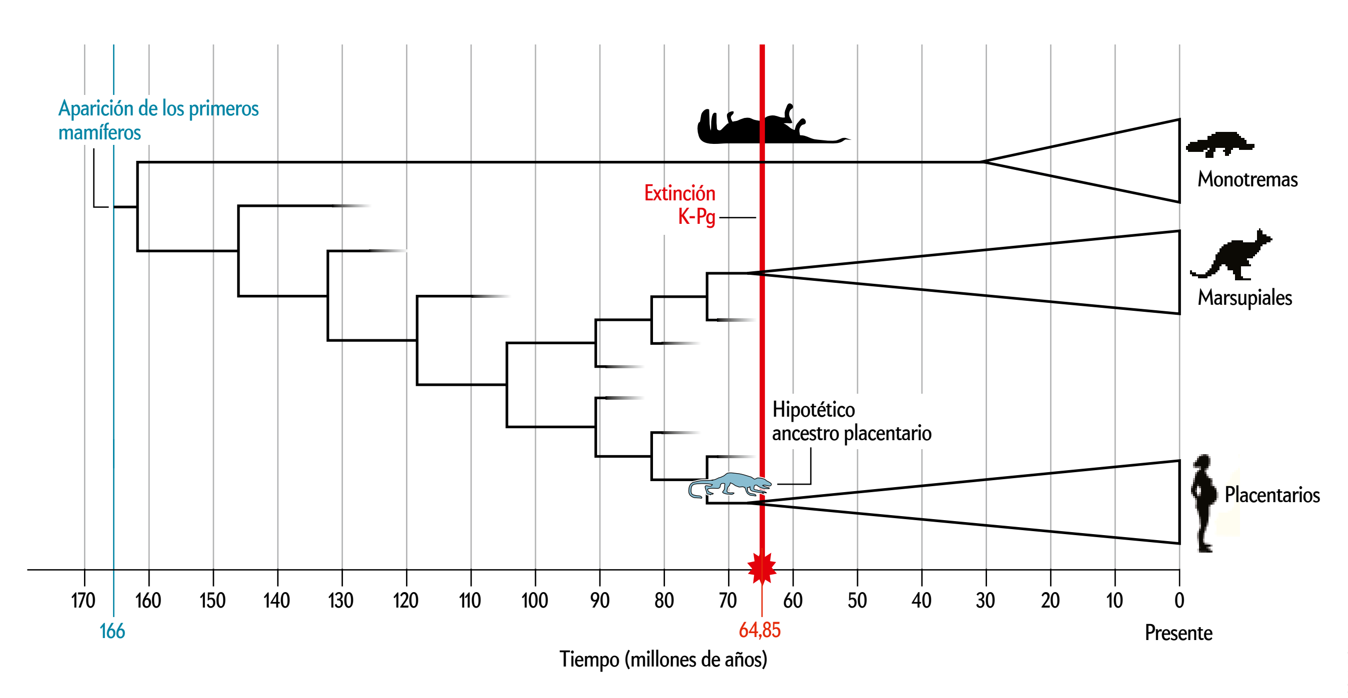
La modelización de los cambios génicos, o construcción de un reloj molecular, atribuye a la estirpe de los mamíferos placentarios una antigüedad mínima de 100 millones de años. Pero pese a la incesante labor de búsqueda de los paleontólogos, el registro fósil se resiste a revelar indicios tan antiguos.

LA CREACIÓN DE LA SUPERMATRIZ

Uno podría preguntarse por qué no se utilizan únicamente los genes o los fenotipos para trazar el árbol. ¿Por qué se necesitan ambos? La respuesta es que la naturaleza de los datos condiciona el aspecto de la copa: si se escoge un tipo, el árbol adquirirá una forma, mientras que si se elige otro, adoptará otra distinta. Por eso, cuando elaboramos un árbol filogenético, nunca queremos omitir ninguna información.

Un concepto importante vinculado con este razonamiento es la distinción entre homología y homoplasia. En condiciones de homología, las especies poseen genes o caracteres similares porque los han heredado de un ancestro común; en la homoplasia, en cambio, los caracteres de las especies son semejantes pero fruto de procesos evolutivos independientes, tal vez porque conferían una ventaja adaptativa concreta. Ambas situaciones son corrientes en la naturaleza y resulta imposible discernir, a través de la mera observación, si los rasgos obedecen a un proceso de homoplasia o de homología. Solo podemos descubrir cuáles de ellos son realmente homólogos dibujando los árboles filogenéticos con todos los datos.

Un conjunto de datos de ese tipo, o supermatriz, tiene el aspecto de una hoja de cálculo repleta de observaciones sobre especies fósiles y vivientes, fotografías y dibujos, mediciones y descripciones minuciosas clasificadas en categorías taxo-



UN MODELO que contempla el registro fósil bajo el prisma filogenético revela que las especies ancestrales de mamíferos placentarios pudieron surgir antes de la extinción del Cretácico-Paleógeno (K-Pg), pero no se diversificaron hasta hace unos 65 millones de años. Esta cronología convertiría a los placentarios en una incorporación relativamente reciente a la clase *Mammalia*, cuyos orígenes se remontarían 100 millones de años atrás.

nómicas. El rápido análisis del genoma gracias a los nuevos métodos de secuenciación, sumado a la inversión del Gobierno estadounidense en las bases de datos de genes (canalizada a través del Centro Nacional para la Información Biotecnológica), han generado un enorme volumen de datos útiles para la cladística. La otra gran fuente de información citada, los datos fenómicos, puede resultar especialmente valiosa, porque constituye el único medio para comparar directamente las especies presentes y pasadas.

En el caso de la clase *Mammalia*, los yacimientos han permitido identificar un notable número de especies. Por lo menos desde principios del siglo xx, los paleontólogos han organizado expediciones a los confines del globo para descubrir nuevos mamíferos fósiles. Expertos de nuestro equipo los han buscado en los cinco continentes, sobre todo en los estratos rocosos del Cretácico superior y Paleógeno inferior, el período clave en que se espera hallar los especímenes que esclarezcan la evolución de los mamíferos placentarios.

Una de las expediciones pioneras más fructíferas partió en 1921, bajo la dirección del Museo Americano de Historia Natural, hacia el desierto del Gobi, en Mongolia. Algunos de los mamíferos fósiles desenterrados en aquella y en otras expediciones posteriores se hallan entre los más completos conocidos. El análisis de estos y otros fósiles mesozoicos demuestra su ubicación en otra rama del árbol de la vida, sin duda muy cercana a la de los *Placentalia*, pero no la misma.

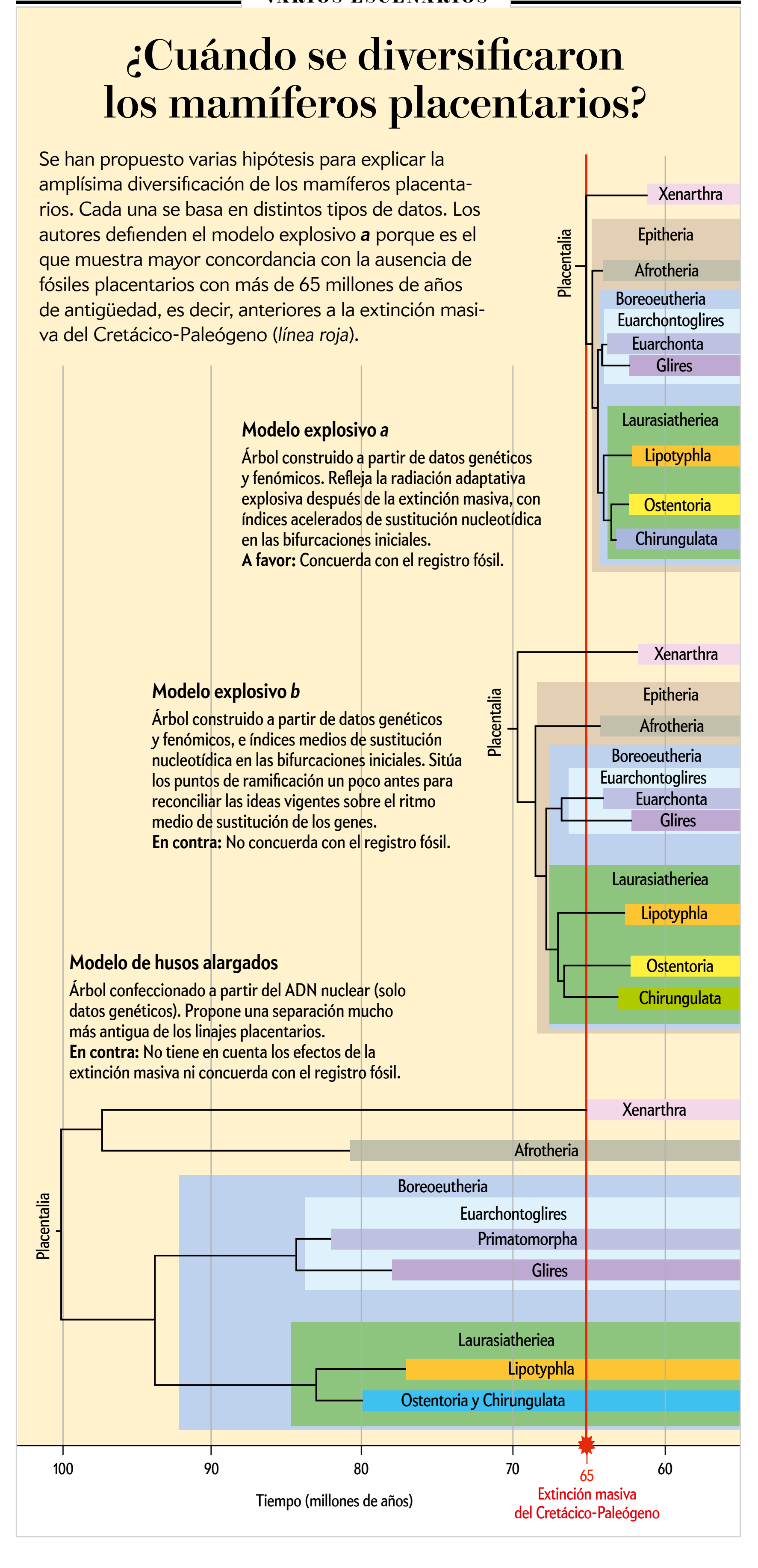
LA IDENTIDAD DE LOS PLACENTARIOS

Cuando queremos definir un grupo de especies, como la clase de los mamíferos, lo primero que se nos ocurre es confeccionar una lista con los caracteres propios de sus integrantes. Pero con este enfoque puede caerse en la trampa de la homoplasia, según se ha explicado antes. La práctica científica actual evita ese engaño definiendo los grupos con el criterio de la ascendencia común. De este modo, la clase *Mammalia* se describe como el ancestro común de los monotremas (con el ornitorrinco como arquetipo) y los placentarios (desde las ballenas hasta los jerbos, los primates y los cánidos), y de todos sus descendientes. Según esta definición, los marsupiales también pertenecen a la clase, porque son parientes más cercanos de los placentarios que de los monotremas.

VARIOS ESCENARIOS

¿Cuándo se diversificaron los mamíferos placentarios?

Se han propuesto varias hipótesis para explicar la amplísima diversificación de los mamíferos placentarios. Cada una se basa en distintos tipos de datos. Los autores defienden el modelo explosivo ***a*** porque es el que muestra mayor concordancia con la ausencia de fósiles placentarios con más de 65 millones de años de antigüedad, es decir, anteriores a la extinción masiva del Cretácico-Paleógeno (*línea roja*).



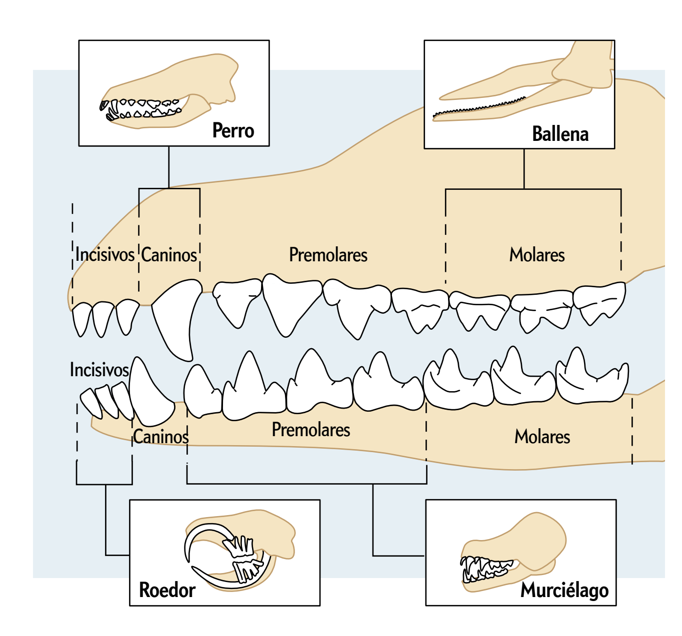
SIGMA XI/AMERICAN SCIENTIST

En el marco de la ascendencia común, retrocedemos en el tiempo para deducir los caracteres que singularizan un grupo de sus parientes más próximos. Este proceso se denomina optimización. Los mamíferos placentarios comparten varios caracteres que los diferencian de sus parientes más cercanos, entre ellos la peculiar pérdida de los huesos epipúbicos, un conjunto de huesecillos insertos en la pared anterior del abdomen.

A pesar de que el árbol de la vida es ambiguo en cuanto al origen de los placentarios, revela información interesante sobre el modo en que algunos mamíferos ocuparon los hábitats actuales. El grupo *Afrotheria* (compuesto por los elefantes y el cerdo hormiguero), identificado con datos moleculares, tiene a sus representantes fósiles más antiguos en el Nuevo Mundo, tanto al norte como al sur del istmo de Panamá. América del Sur era una isla-continente en el Cretácico superior y el Paleoceno, por lo que los miembros primitivos del grupo tuvieron que dispersarse por las Américas y después por África. Los autores de los modelos de reloj molecular sostienen que la fragmentación del supercontinente Gondwana aceleró la diversificación de los placentarios; nuestro equipo, en cambio, defiende que la diversificación y la ruptura de Gondwana no guardan ninguna relación entre sí.

Algunas cuestiones anatómicas, debatidas a lo largo de décadas, tenían que estar asentadas antes de emprender el proyecto. Una de ellas eran las homologías dentarias entre los marsupiales y los placentarios. Ambos grupos poseen siete dientes detrás de los caninos, una combinación de premolares y molares. Pero las diferencias morfológicas de las piezas entre las especies extintas han suscitado desde hace tiempo la pregunta de si los siete dientes de los placentarios se corresponden con los de los marsupiales. Después de semanas de debate, los expertos reconocieron que el peso de las pruebas aportadas por la biología del desarrollo y por los extraordinarios especímenes fosilizados que conservan la dentición de leche conducía inequívocamente a una conclusión: solo seis de los dientes son equiparables entre ambos grupos, porque el primer premolar del marsupial adulto equivale en realidad a un diente de leche del placentario (que es reemplazado por el adulto durante el crecimiento). Ello obliga a modificar la nomenclatura acuñada hace más de un siglo, un cambio que afecta a miles de tipos de mamíferos.

Otra controversia giraba en torno al grupo mamífero más cercano de los primates. Hemos descubierto uno llamado *Sundatheria* que abarca los *Dermoptera* (lémures voladores) y *Scandentia* (musarañas arborícolas). Algunos grupos nuevos nombrados tras la introducción de los datos moleculares en el análisis filogenético también quedaron confirmados, como *Afrotheria* y *Euarchonta*, así como la ubicación de *Cetacea* (ballenas y delfines) como parientes cercanos de los hipopótamos. La matriz combinada de datos también avala la existencia del grupo de los *Tethytheria*, que engloba a manatíes y elefantes, más emparentados entre sí que con ningún otro placentario. Los primeros fósiles de este grupo se descubrieron en las antiguas orillas del mar de Tethys, que cubrió gran parte de la actual cuenca mediterránea.



LA DENTICIÓN del hipotético ancestro placentario se caracteriza por poseer tres molares (los mismos que tenemos hoy) triangulares, en lugar de cuadrados como los humanos. Además, el primer mamífero placentario carecía de la especialización dentaria que observamos en los grupos actuales: los dientes agudos y cortantes de los cánidos, los uniformes y cónicos de los cetáceos, los incisivos de crecimiento continuo de los roedores, o los aserrados de los murciélagos insectívoros, entre otros ejemplos.

SIGMA XI/AMERICAN SCIENTIST

EL ANCESTRO COMÚN

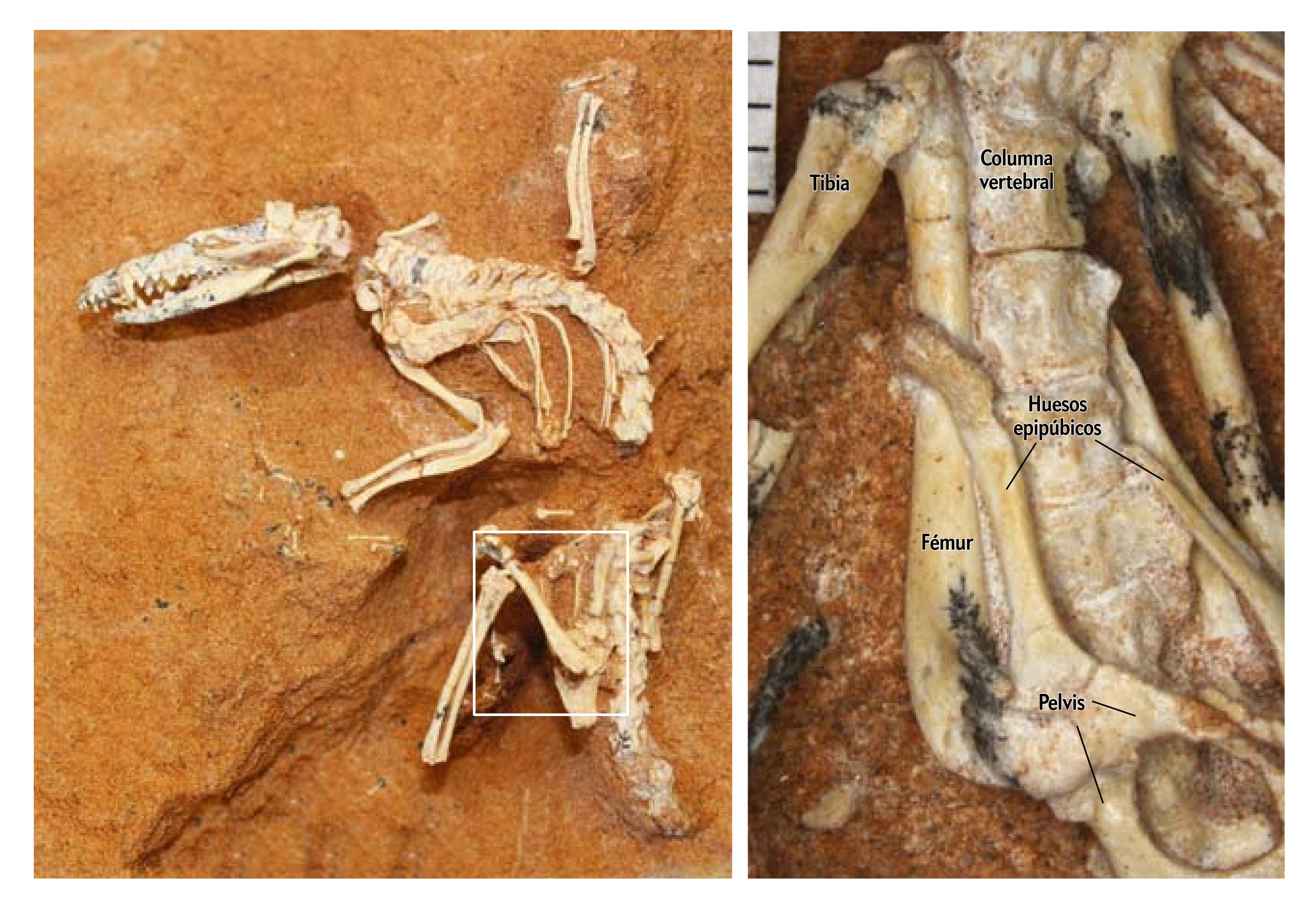
Recientes trabajos sobre el origen y la radiación de los placentarios ejemplifican los nuevos enfoques imaginativos que se están aplicando en el campo de la anatomía comparada. De estudios así procede la reconstrucción del desconocido ancestro común.

Gracias a la colaboración entre el ilustrador científico Carl Buell y nuestro equipo se han logrado reunir en tal recreación los datos dispares del árbol de los placentarios. El gran mérito del artista ha consistido en dibujar algo que ni él ni nadie ha podido ver jamás, basándose únicamente en la optimización de los caracteres del árbol. Después de un intenso diálogo con los expertos, Buell compuso una soberbia síntesis visual del supuesto ancestro placentario en un ecosistema del Paleógeno.

Aparte de la fisonomía externa, logró recrear numerosos caracteres internos. Los dientes son una de las partes que mejor se conservan fosilizadas del cuerpo de los mamíferos. La dentición de los placentarios ha evolucionado hasta adquirir el enorme abanico de formas, tamaños y números actual, como se observa en los escasos dientes de los cánidos especializados en desgarrar la carne, los anchos molares trituradores de las ovejas, o los largos colmillos y los molares achatados, bulbosos y lisos de algunos murciélagos. Todos ellos se diversificaron con el tiempo a partir de la misma dentición ancestral, con igual morfología y fórmula.

Reconstruimos la dentición del mamífero placentario ancestral, que era muy distinta de la de sus descendientes: molares triangulares, incisivos pequeños pero aguzados y, como dientes más sobresalientes, los caninos. En cambio, incluso los murciélagos, los carnívoros y los ungulados más primitivos pueden distinguirse por su cambiante anatomía dental. Estas especies surgen menos de 10 millones de años después del límite K-Pg, un plazo relativamente breve en la escala evolutiva en el que todos modificaron la dentición primigenia.

Los datos fenómicos y genómicos se están integrando en lo que llamamos análisis filogenéticos simultáneos para ofrecernos la visión más completa de la historia de la vida terrestre. Las nuevas herramientas de Internet permiten a los anatomistas comparativos dejar de trabajar en solitario como eruditos deci-



ESTE NOTABLE ESPECIMEN de *Ukhaatherium nessovi*, mamífero extinto que vivió hace unos 80 millones de años, fue descubierto en el desierto del Gobi, Mongolia. Los huesos epipúbicos (*derecha*) situados en la parte anterior de la región pélvica han desaparecido en los placentarios, pero persisten en los parientes cercanos como este fósil del Cretácico.

FÓSIL RECOLECTADO POR UN EQUIPO CONJUNTO DEL MUSEO NORTEAMERICANO DE HISTORIA NATURAL Y LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MONGOLIA. © MICHAEL NOVACEK. SUZANN GOLDBERG (*fotografía*)

monónicos y formar equipos virtuales que intercambian ideas e imágenes en tiempo real. Este enfoque abre nuevos caminos para el trazado del árbol universal de la vida, donde tendrán cabida desde los insectos y las medusas hasta los dinosaurios, y desde las diatomeas hasta las plantas.

En el proyecto del Árbol de la Vida de los mamíferos, tan importante es el modo en que los especialistas en filogenia actuales colaboran para afrontar incógnitas mayores y más complejas como cualquier hallazgo específico. Pese a los avances logrados por los equipos que operan con el nuevo *software*, la organización de los datos fenómicos del árbol de la vida constituye una tarea colosal que exigirá la intervención de millares de estudiosos y del público. Por esta razón, y con el fin de fomentar la participación en el proceso científico del descubrimiento de nuestros orígenes, hemos configurado el proyecto para que sea de acceso abierto en www.morphobank.org.

Los nuevos proyectos emprendidos por la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU. exploran técnicas de participación colectiva (*crowdsourcing*) para hacer posible que el público ayude a los científicos a evaluar los caracteres mostrados en imágenes. Otras estrategias recurren a algoritmos informáticos para recabar en la bibliografía información sobre los rasgos. Expertos en moluscos, plantas y otros grupos de seres vivos están elaborando matrices filogenéticas de algunas ramas del árbol de la vida y están utilizando MorphoBank. A buen seguro que en las décadas venideras el torrente de información anatómica quedará encauzada en las matrices en línea, las cuales permitirán divulgar el conocimiento científico sobre la evolución biológica en todo el mundo.

PARA SABER MÁS

100 million years of land vertebrate evolution: The Cretaceous-Early Tertiary transition. Michael J. Novacek en *Annals of the Missouri Botanical Garden*, vol. 86, págs. 230-258, 1999.

Quantitative analysis of the timing of the origin and diversification of extant placental orders. J. David Archibald y Douglas H. Deutschman en *Journal of Mammalian Evolution*, vol. 8, págs. 107-124, 2001.

The supermatrix approach to systematics. Alan de Queiroz y John Gatesy en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 22, págs. 34-41, 2007.

Impacts of the Cretaceous terrestrial revolution and the KPg extinction on mammal diversification. Robert W. Meredith et al. en *Science*, vol. 334, págs. 521-524, 2011.

The placental mammal ancestor and the post-KPg radiation of placentals. Maureen A. O'Leary et al. en *Science*, vol. 339, págs. 662-667, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Mamíferos de la isla de Europa. Gerhard Storch en *IyC*, abril de 1992.

Reptiles y mamíferos del Mesozoico de Madagascar. John J. Flynn y André R. Wyss en *IyC*, abril de 2002.

Mamíferos desaparecidos de Sudamérica. John J. Flynn, André R. Wyss y Reynaldo Charrier en *IyC*, julio de 2007.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,90€



PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorra un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 27,60€

SELECCIONES TEMAS

Ahorra más del 25 %

Ponemos a tu disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materias.

3 ejemplares = 15,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. MEDIOAMBIENTE
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. ENERGÍA
Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorra más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 12,00 €

más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Para efectuar tu pedido:

Teléfono: (34) 934 143 344

A través de nuestra Web:

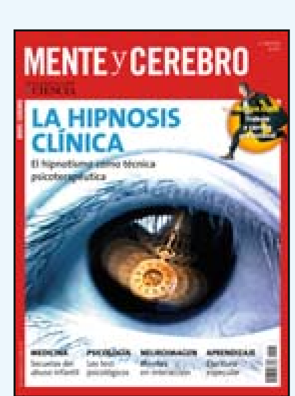
www.investigacionyciencia.es

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica
MyC 69: Cartografía cerebral

(*) Disponible solo en formato digital





TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,90 €

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner
T-78: Inteligencia animal

(*) Disponible solo en formato digital

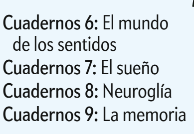




MENTE y CEREBRO Cuadernos

Precio por ejemplar: 6,90 €

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria





BIOLOGÍA

VIDA A LO GRANDE

El microscopio permite descubrir belleza en los lugares más inesperados

Kate Wong

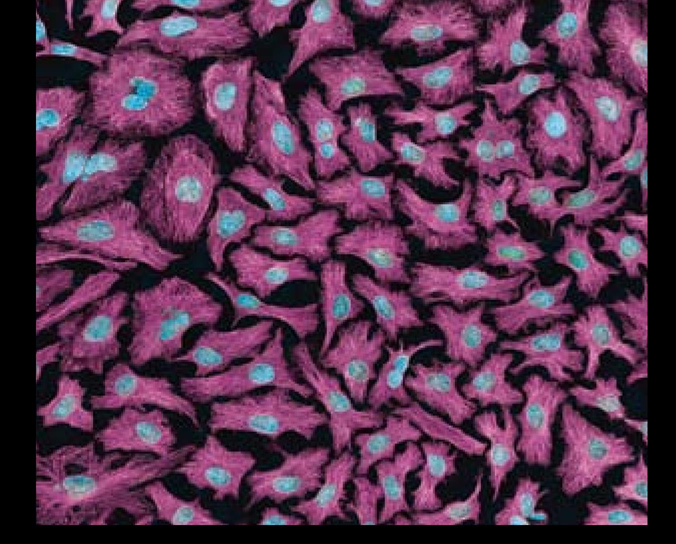
Corre el año 1665. Un joven científico inglés llamado Robert Hooke publica un libro titulado *Micrographia* que en poco tiempo alcanza un enorme éxito. La obra contiene descripciones y primorosas ilustraciones de la mano del propio Hooke que muestran detalles de la naturaleza hasta entonces invisibles. Con ayuda del microscopio compuesto que él mismo ha ideado expone las patas articuladas de una pulga, los ojos compuestos de una mosca o las formas estrelladas de los copos de nieve. Quizá lo más notable sean las observaciones de delgadas láminas de corcho, un material vegetal que, como el microscopio desvela, está formado por celdillas hexagonales similares a los panales de abeja. Hooke las bautiza con el nombre de «células».

Tres siglos y medio después, la microscopía sigue revelando lo extraordinario de lo mundano y continúa ampliando nuestro conocimiento del planeta que habitamos, en ocasiones con una estética asombrosa. En las páginas siguientes celebramos la unión de la ciencia y el arte con una selección de fotografías del concurso de imágenes digitales de biopaisajes de 2014, organizado por Olympus. Desde la armadura de plancton de 37,6 millones de años de antigüedad y con aspecto de calamar monstruoso hasta las ruedas dentadas que impulsan los atléticos brincos de una chinche saltadora, las imágenes mostradas reivindican la belleza que nos rodea; basta con mirar a través de la lente adecuada.



EL AVANCE DEL CÁNCER

Cerca del noventa por ciento de las muertes causadas por cáncer no son consecuencia del tumor inicial, sino de células de este que migran a otras partes del cuerpo. La fotografía de este osteocito, obra del biólogo celular Dylan Burnette, de la Universidad Vanderbilt, muestra la maquinaria desplegada por las células tumorales para invadir los tejidos circundantes. El esqueleto de la célula (*violeta*) la hace avanzar con la ayuda de una molécula llamada miosina II (*verde*). El ADN aparece coloreado de amarillo.



CÉLULAS INMORTALES

Las células uterinas cancerosas de una paciente llamada Henrietta Lacks fueron las primeras que se clonaron de un ser humano. Denominadas células HeLa en memoria de ella, han sido y son muy utilizadas en la investigación biomédica porque se multiplican con facilidad en cultivo. Son, por tanto, «inmortales», a diferencia de la mayoría de las demás células humanas, que mueren en cuestión de días. Thomas Deerinck, del Centro Nacional de Microscopía e Investigación por la Imagen, de la Universidad de California en San Diego, marcó las células con un colorante fluorescente. La proteína tubulina, componente de estructuras esenciales para la división celular, aparece en color rosa, y el ADN, en azul.

APÉNDICES DE BALANO

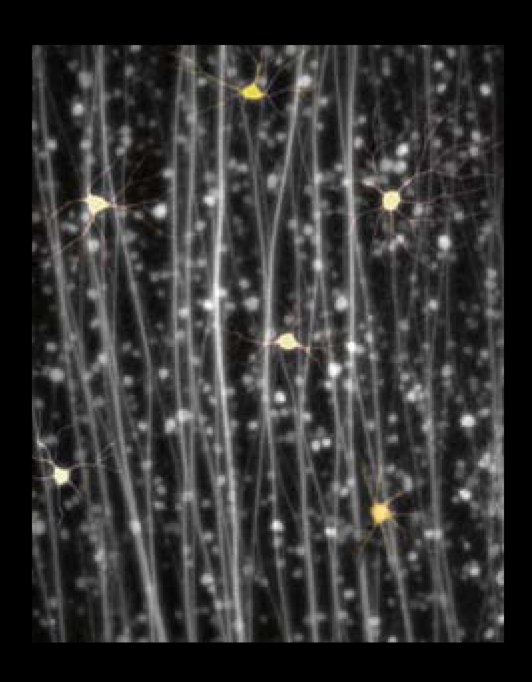
Las incrustaciones blancuzcas que tantas molestias causan en los cascos de las embarcaciones esconden unos animalillos notablemente complejos, según demuestra esta fotografía de las extremidades de un balano. El neurobiólogo Igor Siwanowicz, del Instituto de Medicina Howard Hughes, creó esta imagen retirando las partes blandas y tiñendo después el exoesqueleto del crustáceo con colorantes que se unen a un polímero llamado quitina. «Siempre me ha fascinado la diversidad y versatilidad de los apéndices de los crustáceos; las patas filtradoras de los balanos son otro ejemplo más de lo que puede surgir de un diseño ancestral común de extremidades».





INSECTO MECÁNICO

Las patas posteriores de las chinches saltadoras, conocidas por sus dotes para el brinco, contienen ruedas dentadas engranadas que sincronizan los movimientos de las patas antes del salto. El mecanismo fue descrito por Malcolm Burrows, de la Universidad de Cambridge, y sus colaboradores en 2013; es el primer ejemplo de engranajes conocido en la naturaleza. Siwanowicz visualizó las ruedas de 0,75 milímetros de diámetro de la chinche con las mismas técnicas empleadas en el balano de la página opuesta.



CÉLULAS RETINIANAS

La retina es la lámina de neuronas que tapiza la pared posterior del globo ocular encargada de captar la luz exterior y transformarla en impulsos eléctricos. En esta imagen de Chris Sekirnjak, investigador posdoctoral del Instituto Salk de Estudios Biológicos de La Jolla, California, las células ganglionares (*amarillo*) de la retina de cobaya envían impulsos al cerebro cuando detectan luz. «Las líneas verticales son haces de axones que transmiten la información desde las neuronas hasta el cerebro a través del nervio óptico», explica Sekirnjak. Cada cuerpo celular mide unos 10 micrómetros de diámetro.



CALAMAR EN MINIATURA

Este plancton marino fósil en fase de quiste se halló en una muestra de perforación extraída a cientos de metros bajo el lecho del mar de Groenlandia. «Me quedé estupefacto porque después de tantos millones de años la estructura microscópica del quiste se hallaba perfectamente conservada», asegura el autor de la fotografía, Stanislav Vitha, de la Universidad A&M de Texas. El plancton, de unos 80 micrómetros de diámetro, emite un resplandor verde cuando queda expuesto a luz láser azul.

ARAÑA CANGREJO

El microscopista aficionado Geir A. M. Drange captó este primer plano de un ejemplar de araña cangrejo (*Misumena vatia*), que colocó sobre un pedazo de hoja seca de arce. En vida, este arácnido cambia de color para confundirse con el entorno (con frecuencia, una flor), un ingenioso truco para tender emboscadas.





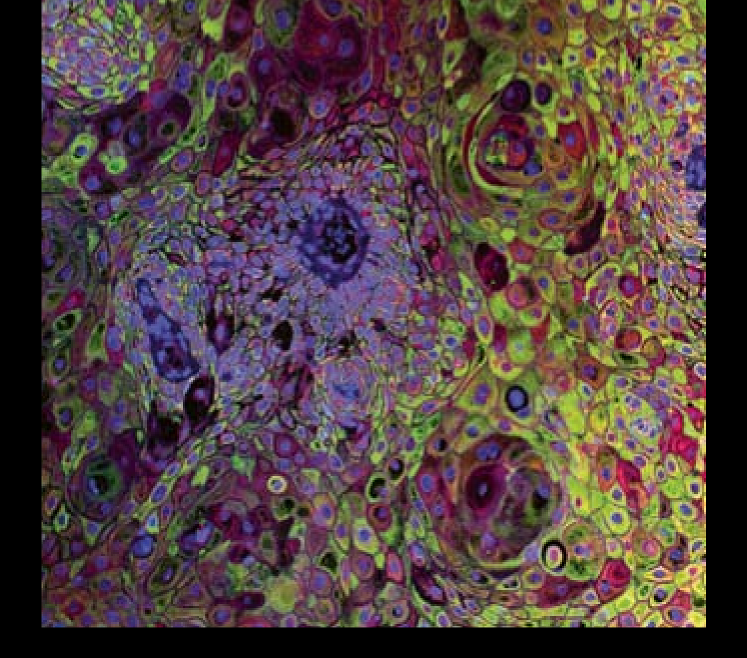
VASCULATURA VEGETAL

El corte transversal del tallo de una planta fanerógama del género *Ranunculus* revela la primorosa arquitectura de los vasos vegetales. En rojo aparecen coloreadas las paredes celulares y en blanco los cloroplastos, los orgánulos celulares que captan la energía del sol. El biólogo Fernán Federici, de la Pontificia Universidad Católica de Chile, creó la imagen tiñendo los tejidos vegetales con colorantes fluorescentes e iluminando la muestra con haces láser de tres longitudes de onda bajo un microscopio confocal.



DESARROLLO DE LA ANGUILA JAPONESA

La tinción de los tejidos saca a la luz la maduración de la anguila japonesa, que es transparente en su etapa larvaria, desde la eclosión (*izquierda*) y a lo largo de los ocho primeros días de vida. La cabeza (*parte superior*) crece con rapidez, y, en el octavo día (*derecha*), los ojos y la boca parecen estar lo bastante desarrollados para que la joven anguila comience a buscar presas. Por contra, el saco vitelino que la ha nutrido hasta entonces aparece encogido. La autora de la fotografía es Tora Bardal, de la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología en Trondheim.

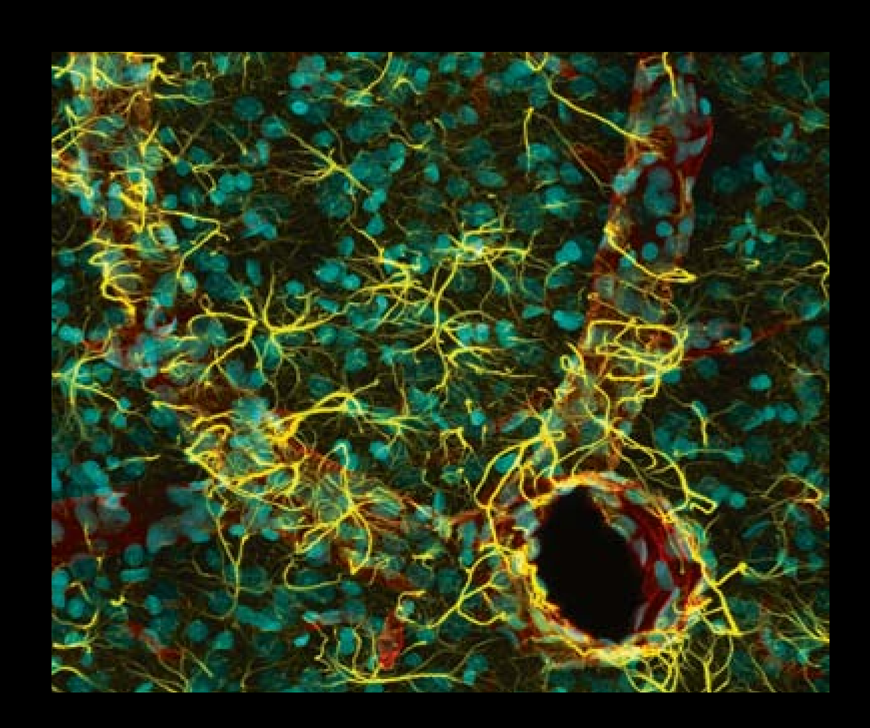


CÁNCER DE PIEL

En un tipo de cáncer de piel llamado carcinoma espinocelular, los queratinocitos (las células que conforman la capa superior de la piel) sintetizan la proteína DIAPH1, que podría facilitar la propagación del tumor a los ganglios linfáticos y los pulmones. La fotografía, tomada por Gopinath Meenakshisundaram y Prabha Sampath, del Instituto de Biología Médica de Singapur, muestra tejido de carcinoma espinocelular humano con queratinocitos que están sintetizando grandes cantidades de DIAPH1 (*rojo*). La queratina, una proteína indicadora de los queratinocitos, aparece en verde, y los núcleos de las células, en azul.

CEREBRO DE RATA

Madelyn E. May visualizó la sustancia gris de la corteza cerebral de una rata cuando era estudiante de grado en el Instituto Politécnico Rensselaer, como parte de un programa para cartografiar a escala subcelular las células gliales que sustentan y protegen las neuronas. La imagen pone de relieve el íntimo vínculo existente entre las células estrelladas de la glía, o astrocitos (*amarillo*), y los vasos sanguíneos (*rojo*).



LENGUA DE GRILLO DOMÉSTICO

La punta de la lengua del grillo doméstico es increíblemente elaborada, con tubos rellenos de aire (*plateado*) que inflan la lengua, y con aros de quitina que mantienen los tubos abiertos. Se desconoce la función de esta compleja estructura, asegura el fotógrafo David P. Maitland: «Me quedé boquiabierto por la delicadeza y la belleza del diseño arquitectónico, y quería fotografiarla como si se tratara de una escultura espléndida».

PARA SABER MÁS

Concurso de imágenes digitales de biopaisajes de Olympus: **www.OlympusBioScapes.com**

EN NUESTRO ARCHIVO

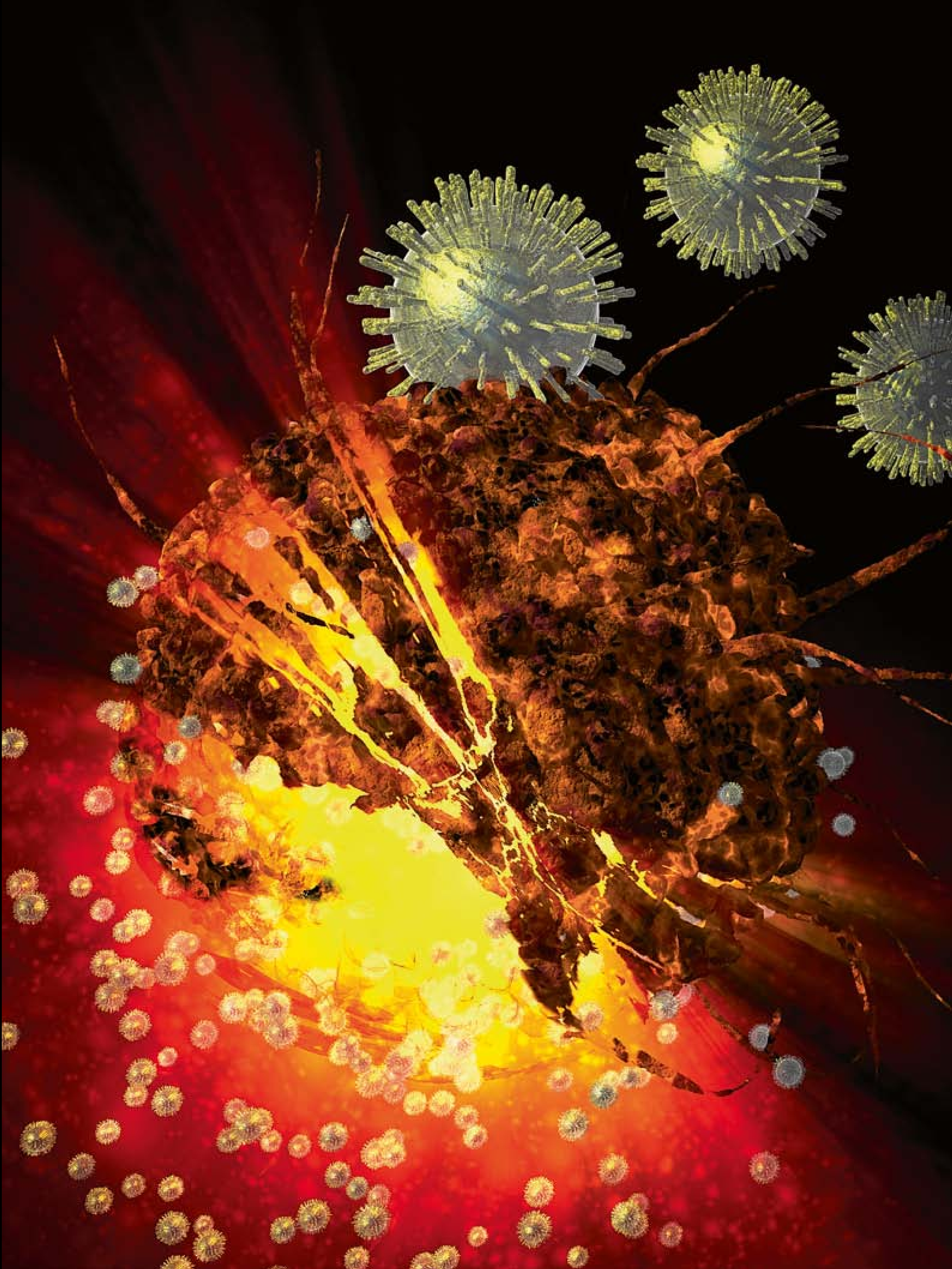
Miniaturas deslumbrantes. G. Stix en *IyC*, febrero de 2012.
Maravillas diminutas. K. Wong en *IyC*, marzo de 2013.
La vida bajo una lente. F. Jabr en *IyC*, enero de 2014.

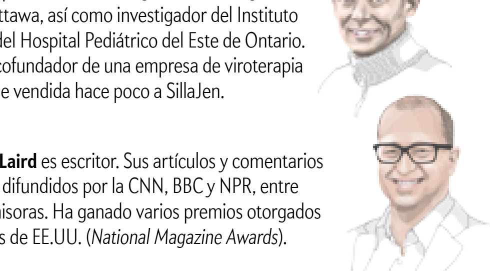
MEDICINA

En algunos pacientes oncológicos, los virus modificados para que destruyan células tumorales operan como un fármaco milagroso. Los esfuerzos actuales se centran en mejorar este logro

VIROTERAPIA CONTRA EL CÁNCER

Douglas J. Mahoney, David F. Stojdl y Gordon Laird





Douglas J. Mahoney es profesor del departamento de microbiología, inmunología y enfermedades infecciosas de la Universidad de Calgary.

David F. Stojdl es profesor de los departamentos de pediatría y de bioquímica, microbiología e inmunología de la Universidad de Ottawa, así como investigador del Instituto de Investigación del Hospital Pediátrico del Este de Ontario. También ha sido cofundador de una empresa de viroterapia oncológica que fue vendida hace poco a SillaJen.

Gordon Laird es escritor. Sus artículos y comentarios han sido difundidos por la CNN, BBC y NPR, entre otras emisoras. Ha ganado varios premios otorgados a revistas de EE.UU. (*National Magazine Awards*).

En 1904, una mujer italiana tuvo que enfrentarse a dos sucesos que pusieron en riesgo su vida: el diagnóstico de cáncer de cérvix uterino y, después, la mordedura de un perro. Tras recibir la vacuna de la rabia, su enorme tumor se desvaneció («*il tumore non esisteva più*»). La mujer vivió sin cáncer hasta 1912. Poco después, esta vacuna (un virus de la rabia atenuado) se administró a otras pacientes italianas con el mismo tipo de cáncer. Tal y como publicó Nicola De Pace en 1910, el tamaño de los tumores de algunas de ellas se redujo, probablemente porque el virus, de alguna manera, había suprimido el cáncer. Sin embargo, al final todas recayeron y terminaron muriendo.

Aunque las pacientes fallecieron, surgió la idea de que se podía tratar el cáncer con virus que destruyeran las células malignas, una estrategia que hoy se denomina viroterapia oncolítica. Los investigadores obtuvieron cierto éxito con animales de laboratorio. Sin embargo, durante mucho tiempo, en los ensayos clínicos con humanos solo se lograron respuestas parciales y alguna que otra curación, un hecho que, sin duda, ha contribuido a que esta línea de investigación quedara relegada a un segundo plano. La viroterapia contra el cáncer se ha enfrentado además a otros obstáculos: la incertidumbre en lo relacionado con sus mecanismos y con la manipulación de los virus para lograr la curación, la escasez de herramientas con las que obtener cepas víricas más eficaces y la reticencia habitual de los médicos a infectar con patógenos a los pacientes. Los médicos preferían utilizar fármacos tóxicos (quimioterapia) en lugar de los microorganismos, sobre todo porque estaban más familiarizados con ellos y porque los conocían mejor.

El panorama actual ha cambiado mucho. Desde principios de los años noventa del siglo xx, los investigadores, dotados de un conocimiento más profundo del cáncer y de los virus, y equipados con métodos para manipular los genes, comenzaron a descubrir los detalles sobre cómo atacan los virus a las células cancerosas. También empezaron a diseñar técnicas para alterar los genes de los virus, con el fin de potenciar su capacidad para combatir el cáncer y evitar que provocaran efectos indeseados.

El trabajo está empezando a dar sus frutos. En 2005 se aprobó en China un virus para tratar el cáncer de cabeza y cuello, y en la actualidad se hallan en fase de ensayo casi una docena de virus contra una amplia variedad de tumores. Los resultados obtenidos en los ensayos más avanzados permiten albergar la esperanza de que, en un par de años, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de los Estados Unidos apruebe uno o más virus como tratamiento contra el cáncer.

Concretamente, los datos presentados en junio de 2013 en el congreso anual de la Sociedad Americana de Oncología Clínica demostraron que, en un gran ensayo de viroterapia para el melanoma metastásico avanzado (un cáncer de piel), el 11

EN SÍNTESIS

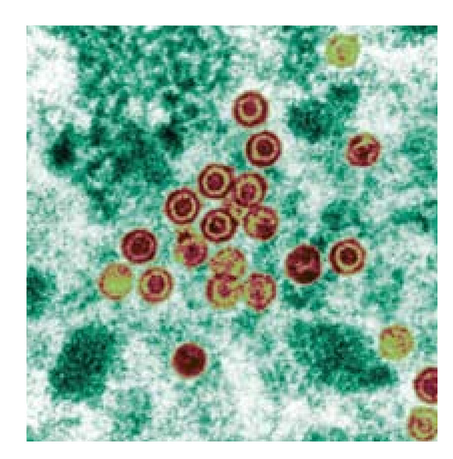
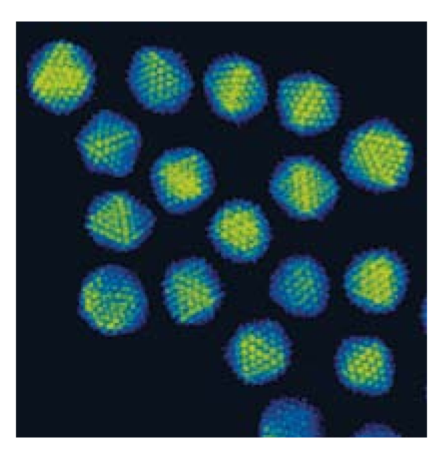
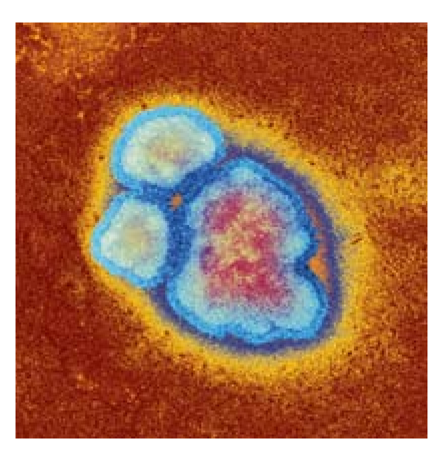
Algunos virus modificados genéticamente podrían infectar y destruir tumores humanos sin causar daños apreciables en los tejidos sanos.

Una vez en el interior de un tumor, estos virus «oncolíticos» se replican profusamente y dan lugar a un ejército de clones víricos con capacidad de buscar e infectar nuevas células cancerosas.

Se está investigando casi una docena de virus en seres humanos, bien como terapias individuales o en combinación con otros tratamientos ya existentes; algunos se hallan en las fases finales de los ensayos clínicos.

Al principio se intentaba reprimir la respuesta inmunitaria para que los virus tuvieran tiempo de actuar contra las células cancerosas antes de que fueran atacados como elementos extraños. Hoy en día, la estrategia es otra: se intentan obtener virus transgénicos que empujen al sistema inmunitario a combatir el tumor.

PÁGINA ANTERIOR: GUYCO

PROGRAMADOS PARA COMBATIR EL CÁNCER: El virus del herpes simple, el adenovirus y el sarampión (*de izquierda a derecha*) son tres de entre una docena de virus que se están modificando genéticamente para infectar y destruir células tumorales y, en algunos casos, impulsar la respuesta inmunitaria contra la enfermedad.

por ciento de los pacientes había experimentado una «remisión completa», esto es, no mostraban ningún signo de cáncer después del tratamiento. El medicamento, denominado T-VEC, es una versión transgénica del virus del herpes simple que combate el cáncer por partida doble. Por un lado, destruye directamente las células cancerosas y, por otro, produce una proteína (GM-CSF) que incita al sistema inmunitario a que también ataque al cáncer. A diferencia de los efectos secundarios causados por distintas oncoterapias, los peores efectos provocados por los virus consistieron en síntomas gripales, como fatiga, escalofríos y fiebre. En noviembre de 2013 y durante la primavera de 2014, la empresa Amgen, que fabrica el medicamento, dio a conocer los datos de supervivencia global. Los pacientes que tomaron T-VEC vivieron cuatro meses más que los que solo se trataron con GM-CSF.

Los datos de supervivencia pueden parecer decepcionantes. No obstante, los investigadores están animados porque uno de cada diez pacientes experimentó una remisión completa. El resultado logrado por T-VEC superaba el de todos los fármacos aprobados recientemente contra el melanoma metastásico. Entre ellos figura el vemurafenib, que fue autorizado en 2011 para tratar este tipo de cáncer después de que un estudio publicado en *New England Journal of Medicine* determinase que había eliminado todo signo de cáncer en una fracción de pacientes mucho menor, inferior al 1 por ciento.

En el caso del T-VEC, uno de los resultados más alentadores se publicó en 2009. Se demostró que cerca del 90 por ciento de los pacientes que habían respondido a la terapia seguían vivos después de más de tres años. Por ejemplo, Sue Bohlin, una mujer de Nueva Jersey que sufría melanoma, no mejoró con los tratamientos estándar y el cáncer seguía propagándose, de modo que entró a formar parte de un ensayo clínico sobre el T-VEC. Tres años después de recibir el medicamento, Bohlin, que actualmente tiene 61 años, sigue viva y no padece cáncer. «Soy una de las afortunadas», comenta. «Para mí ha sido un fármaco milagroso.»

El objetivo, por supuesto, consiste en lograr que el caso de Bohlin se convierta en la norma, de manera que más del 11 por ciento de los pacientes se libren de su tumor. Algunos de los virus utilizados en los ensayos clínicos podrían conseguirlo. Mientras tanto, los investigadores, entre ellos dos de nosotros (Stojdl y Mahoney), continuamos explorando vías para que la viroterapia resulte más eficaz y funcione en más personas.

SCIENCE SOURCE

MÁQUINAS BIOLÓGICAS PROGRAMABLES

Los virus presentan una serie de características que resultan atractivas para la terapia contra el cáncer, por lo que se está tratando de potenciar algunas de ellas para aumentar su eficacia y su seguridad. Por poner un ejemplo, ciertos virus —bien por sí mismos, bien con algo de ayuda— pueden infectar las células cancerosas de forma selectiva, sin atacar a las normales, o solo crecen bien en el interior de las células malignas y dejan las sanas indemnes. Este tipo de selectividad es importante a la hora de minimizar los efectos secundarios, que se deben sobre todo al daño causado en los tejidos normales.

Una vez en el interior de una célula tumoral, los virus pueden convertirse en verdaderas máquinas destructoras. Ninguno de ellos puede reproducirse por sí mismo; pero si hallan las condiciones adecuadas dentro de una célula, se apropian de la maquinaria de esta para copiar genes y fabricar proteínas y logran así multiplicarse. En el tratamiento del cáncer, si todo va bien, un virus generará un ejército de clones que saldrán en tropel de la célula tumoral infectada en busca de células cancerosas vecinas, o incluso distantes, a las que infectar. A veces, a medida que van saliendo, los virus hacen estallar literalmente la célula infectada (un fenómeno que se conoce como lisis celular), de ahí el nombre de viroterapia «oncolítica». En otros casos, atacan a la célula tumoral de una forma más sigilosa, al programarla para que inicie una secuencia de autodestrucción denominada suicidio celular, o apoptosis. Básicamente, los virus administrados convierten las células infectadas en fábricas que, en el interior del organismo, producen de forma masiva más y más medicamento, una acción que cesa cuando terminan su cometido.

Otro aspecto ventajoso de la viroterapia es que emplea una estrategia múltiple. Muchos fármacos antineoplásicos interfieren con un único aspecto del funcionamiento de la célula, lo cual representa un inconveniente, porque las células malignas suelen acabar encontrando la manera de compensar el efecto. Además, si bien los tumores constituyen un ecosistema en el que todas las células descienden de una célula ancestral alterada, al final el conjunto presenta diversas anomalías genéticas y de otros tipos; de este modo, un medicamento que actúa sobre ciertas células puede no funcionar en otras. Estas son dos razones por las que los tumores se vuelven resistentes al tratamiento, que se reproducen de nuevo y terminan matando a los pacientes [*véase* «Heterogeneidad intratumoral», por Ignacio Varela; Investigación y Ciencia, octubre de 2014]. De ahí que los médicos

CÓMO FUNCIONA

Así destruyen los virus oncolíticos los tumores

No todos los virus atacan a las células cancerosas, pero algunos lo hacen con eficacia y a la vez dejan indemnes los tejidos sanos. Se está intentando modificar estos virus (*inserto de la izquierda*) para potenciar la respuesta inmunitaria contra el cáncer (*abajo*). Idealmente, esta estrategia podría acompañarse de nuevos tratamientos (*no mostrados*) que anulen la inmunodepresión provocada por el tumor.

Virus oncolítico

Gen del antígeno

Se insertan en los virus genes que codifican antígenos tumorales (moléculas que inducen respuestas inmunitarias). Las células cancerosas infectadas producen entonces los antígenos, lo cuales estimulan la respuesta inmunitaria contra dichas células.

Vaso sanguíneo

Virus replicándose

Lisis de la célula tumoral (*gris oscuro*)

Célula tumoral infectada

Células tumorales

Virus oncolítico

Muerte directa (lisis) de las células cancerosas

Una vez dentro de la célula, el virus la obliga a fabricar muchas copias de sí mismo. Los nuevos virus salen en tropel de la célula, matándola, y buscan nuevas células cancerosas a las que infectar. O tal vez simplemente reprogramen las células tumorales para que se autodestruyan mediante un proceso denominado apoptosis.

Célula tumoral infectada

Neutrófilo

Célula endotelial infectada

Antígeno

Colapso vascular

Los virus también infectan a las células que revisten los vasos sanguíneos del tumor. A medida que estas mueren, comienzan a atraer a los neutrófilos, un tipo de leucocitos que contribuyen a formar coágulos sanguíneos. Ello da lugar, en última instancia, al colapso del vaso, lo cual obstruye el suministro de nutrientes al tumor.

Respuesta inmunitaria adaptativa

Cuando una célula cancerosa infectada estalla, libera antígenos (entre ellos, los creados mediante ingeniería genética) que son engullidos por las células dendríticas del sistema inmunitario. A su vez, estos antígenos son presentados a los linfocitos T del organismo, que parten a la caza de otras células tumorales que compartan el mismo antígeno.

Señales de peligro y citocinas

Apoptosis de la célula tumoral

Sangre coagulada

Células dendríticas

Apoptosis de la célula tumoral

Linfocito T activado

Linfocito T

Célula dendrítica

Célula tumoral muerta

Linfocito citolítico natural

Antígeno tumoral

Colapso vascular

Linfocito citolítico natural

Respuesta inmunitaria innata

La muerte de las células infectadas por el virus provoca la liberación de moléculas que estimulan al sistema inmunitario (entre ellas, señales de peligro y citocinas) que incitan a los linfocitos citolíticos naturales a destruir otras células tumorales, estén infectadas o no.

Hacia tumores distantes

Nódulos linfáticos del sistema inmunitario

FUENTE: «TARGETED AND ARMED ONCOLYTIC POXVIRUSES: A NOVEL MULTI-MECHANISTIC THERAPEUTIC CLASS FOR CANCER», POR DAVID H. KIRN Y STEVE H. THORNE EN *NATURE REVIEWS CANCER*, VOL. 9, ENERO DE 2009; TAMI TOLPA (*ilustración*)

a menudo intenten combatir el cáncer con más de una estrategia, de forma similar a como se atiende hoy a los pacientes con VIH. La viroterapia se parece más a una politerapia que a un tratamiento único, ya que los virus desbaratan a la vez varios procesos de la célula, por lo que resulta menos probable que esta se vuelva resistente.

Además de destruir directamente el tumor, cuando un virus infecta a una célula pone en marcha varios mecanismos accesorios, como el denominado colapso vascular, que pueden destruir las células cancerosas que han resistido a la infección. Aunque los virus oncolíticos manifiestan selectividad hacia las células del tumor, algunas cepas invaden también sus vasos sanguíneos. A su vez, esta infección secundaria atrae a las células inmunitarias que dañan los vasos, con lo que se interrumpe el flujo de sangre hacia el tumor. Otro mecanismo importante consiste en la rápida afluencia de células inmunitarias hacia el tumor para frenar la infección inicial. Durante mucho tiempo se ha considerado que tal respuesta constituía uno de los principales obstáculos a los que se enfrenta la viroterapia; después de todo, un ataque repentino y poderoso debería, en teoría, eliminar las células infectadas antes de que el virus pudiese propagarse a muchas células. De hecho, los primeros esfuerzos se centraron en mantener a raya las defensas para dar tiempo al microorganismo a infiltrarse en el tumor.

Pero algunos trabajos aún más recientes han demostrado que, a veces, las células inmunitarias son redirigidas hacia el propio cáncer y, en muchos casos, resultan fundamentales para el éxito terapéutico. Aunque no conocemos todos los detalles sobre cómo, cuándo y por qué tiene lugar este cambio, sí sabemos que el proceso de infectar y destruir células tumorales genera restos celulares que inducen la producción de pequeñas moléculas inmunitarias, las citocinas, así como la activación de las células dendríticas, también del sistema inmunitario. Estas últimas vigilan el organismo en busca de entes ajenos al organismo y alertan a los linfocitos T para que pongan en marcha una respuesta contra el aparente invasor. En este caso, se cree que las células dendríticas consideran a los componentes del tumor como «extraños» y avisan de ello al sistema inmunitario.

Además de las posibles ventajas comentadas, los virus pueden programarse para que se comporten de un modo en que los análogos naturales no lo harían. Por ejemplo, pueden modificarse genéticamente para hacer disminuir su capacidad de reproducción en las células sanas y aumentar de modo selectivo su replicación en las cancerosas. También puede alterarse el genoma para dotar al microorganismo de otros rasgos que le ayuden a luchar contra el cáncer, como la capacidad del virus de T-VEC de estimular el sistema inmunitario contra el tumor.

SUPERVIRUS

Los investigadores están aprovechando todos estos conocimientos para mejorar la viroterapia de varias maneras, algunas de las cuales se están examinando en ensayos clínicos en curso. Una de las estrategias intenta obtener virus transgénicos que se dirijan hacia determinadas moléculas denominadas receptores, que son más abundantes en las células cancerosas que en las normales. La unión de los virus de estos receptores facilita su entrada en las células. Tal modificación contribuiría a garantizar que las células cancerosas captaran muchos más virus que las sanas.

Una segunda estrategia, más compleja, trata de potenciar la propensión de los virus a replicarse mejor en las células cancerosas. Debido a que estas se multiplican sin cesar, deben sintetizar una enorme cantidad de materias primas. Los virus también necesitan estas sustancias, por lo que tenderán a proliferar o crecer mejor en una célula maligna que en otras células a las que hayan podido acceder. Conocedores de este hecho, los científicos han modificado virus para que sean muy receptivos ante un exceso de materias primas en las células tumorales. De este modo, pueden obtener un virus transgénico que no produzca timidina, uno de los materiales de construcción del ADN. Sin esta capacidad, el virus se ve obligado a buscar una fuente externa de la molécula, que hallan en abundancia en las células tumorales. Por el contrario, las células normales no la presentan en suficiente cantidad como para que el virus se replique. Esta estrategia se halla en las fases inicial e intermedia de los ensayos clínicos.

El grupo de John Bell, del Instituto de Investigación del Hospital de Ottawa (donde Stojdl trabajó como investigador posdoctoral), y el equipo de Glen Barber, de la Universidad de Miami, han identificado otra razón por la que los virus pueden proliferar en las células cancerosas. A medida que las células experimentan cambios genéticos y de otro tipo que las convierten en malignas, suelen perder parte de sus defensas contra un ataque microbiano, como la capacidad para producir una molécula antivírica denominada interferón. Estos grupos y otros han diseñado virus teniendo en cuenta esta debilidad. Tal es el caso del virus de la estomatitis vesicular (VSV), modificado para que no crezca en ninguna célula excepto en los tumores con una defensa antivírica deficiente. Uno de estos VSV se está ensayando en pacientes con cáncer hepático.

Para nosotros y para muchos de nuestros colegas, los mayores beneficios se obtendrán cuando logremos aumentar la capacidad de los virus para inducir respuestas inmunitarias contra los tumores. En los ensayos con T-VEC se descubrió que el virus no accedía a todas las células metastásicas que se habían desprendido del tumor primario. Aun así, el 11 por ciento de los pacientes experimentó una remisión completa, quizá porque el microorganismo había estimulado al sistema inmunitario para que buscara y destruyera también las células a las que el virus no había llegado. El hecho de que se descubriesen linfocitos T activados en los lugares donde había metástasis refuerza esta posibilidad.

En otra estrategia relacionada con la inmunidad, liderada por nuestros colegas de la Universidad McMaster en Ontario y de la Clínica Mayo en Rochester, Minnesota, Stojdl está introduciendo en virus genes que codifican antígenos tumorales (como el antígeno asociado al melanoma, o MAGE). Se trata de unas moléculas que estimulen las defensas cuando se hallan presentes en las células cancerosas. En animales tratados, los antígenos son presentados al sistema inmunitario, al que incitan para que se dirija hacia las células cancerosas y las destruya; al mismo tiempo, el virus oncolítico mata directamente a las células malignas y produce cambios en el microentorno del tumor, de forma que pone en marcha otras respuestas inmunitarias. Se espera que este año comiencen los ensayos clínicos con seres humanos.

La idea de impulsar el sistema inmunitario resulta prometedora. Pero, después de décadas de investigación sobre inmunoterapia, hemos aprendido una importante lección: los tumores han desarrollado muchas maneras de esquivar el ataque inmunitario, por lo que tal vez se necesite también tratar al mismo tiempo a los pacientes con otros agentes que moderen la inmunodepresión existente en el interior del tumor. No importa cuánto estimulemos al sistema inmunitario si el tumor es muy hábil a la hora de atenuar la respuesta.

Junto con colaboradores de la Universidad de Calgary, uno de nosotros (Mahoney) está intentando desactivar las células que reprimen la respuesta inmunitaria y que sabemos que se alojan en el tumor, al mismo tiempo que se administran los virus oncolíticos. Al inhibir estas células, el sistema inmunitario activado por el virus debería librarse de la supresión y, por tanto, podría combatir el cáncer de forma más eficaz. Para neutralizar las células represoras, nos hemos aprovechando de décadas de trabajo realizado por otros investigadores, que han estado diseñando moléculas que actúan directamente sobre la inmunodepresión y la neutralizan; este tipo de fármacos, entre ellos los anticuerpos monoclonales que se unen a una molécula denominada PD-1, constituyen una de las oncoterapias de última generación más prometedoras. Es casi seguro que estas estrategias combinadas, así como la administración de virus junto a las intervenciones tradicionales, configurarán el futuro de la viroterapia oncolítica, debido a su capacidad de ayudar a los pacientes que no responden a un tratamiento basado solo en los virus.

Sin embargo, debemos mostrarnos cautos a la hora de considerar la aplicación de tratamientos combinados. Aunque, hasta el momento, la viroterapia ha resultado ser segura en los ensayos clínicos —se han descrito muy pocos casos adversos graves, lo que contrasta enormemente con la mayoría de los medicamentos oncológicos experimentales—, desconocemos cómo se comportarán los virus cuando se combinen con otras estrategias basadas en la inmunoterapia o cuando se incremente su dosis. «Hasta la fecha, la viroterapia oncolítica ha resultado muy segura», afirma nuestro colega Stephen Russell, catedrático de medicina de la Clínica Mayo. «Pero, a medida que intentamos aumentar su potencia y ampliar su utilidad —especialmente cuando se desea modular la inmunidad del huésped—, corremos el riesgo de provocar toxicidad; debemos ser conscientes de ello», advierte.

Aprovechar el potencial de los virus para tratar el cáncer ha supuesto un trabajo de larga duración que todavía continúa. Como resultado de décadas de investigación en genética molecular, biología del cáncer, inmunología de los tumores, inmunoterapias, virología y terapias génicas, los científicos disponen por fin de las herramientas y conocimientos necesarios para aprovechar estas interacciones entre los virus y el organismo para combatir el cáncer. Ya se ha demostrado que la viroterapia oncolítica funciona. Ahora se trata de lograr que funcione en más pacientes y de hacer por fin realidad el sueño que tuvo De Pace hace cien años de emplear los virus para salvar la vida de las personas.

PARA SABER MÁS

Novel oncolytic viruses: Riding high on the next wave? Marianne M. Stanford et al. en *Cytokine & Growth Factor Reviews*, vol. 21, n.os 2-3, págs. 177-183, abril-junio de 2010.

Thunder and lightning: Immunotherapy and oncolytic viruses collide. Alan Melcher et al. en *Molecular Therapy*, vol. 19, n.o 6, págs. 1008-1016, junio de 2011.

The emerging role of viruses in the treatment of solid tumours. M. G. Bourke et al. en *Cancer Treatment Reviews*, vol. 37, n.o 8, págs. 618-632, diciembre de 2011.

Virotherapy-cancer targeted pharmacology. Alison Tedcastle y col. en *Drug Discovery Today*, vol. 17, n.o 5-6, págs. 215-220, marzo de 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Desactivar el cáncer. Jedd D. Wolchok en *IyC*, julio de 2014.

Klaus G. Strassmeier es director científico del Instituto Leibniz de Astrofísica de Potsdam (AIP). Experto en campos magnéticos cósmicos, sus investigaciones incluyen la fotometría y espectroscopia de estrellas con actividad magnética.

Regina von Berlepsch dirige el Centro de Documentación del AIP y ejerce como secretaria de la Sociedad Astronómica Alemana.



HISTORIA DE LA ASTRONOMÍA

Pioneros de la fotometría fotoeléctrica

Hace un siglo, Paul Guthnick perfeccionó el uso del fototubo para medir de manera objetiva el brillo de las estrellas. Así nacieron las bases de una técnica que hoy no falta en ningún observatorio

Klaus G. Strassmeier y Regina von Berlepsch



LOS DISPOSITIVOS DESTINADOS A MEDIR EL BRILLO DE LAS ESTRELLAS —Y, EN PARticular, sus variaciones en el transcurso del tiempo— forman parte del equipamiento astrofísico básico de cualquier observatorio del planeta, ya pertenezca a profesionales o a aficionados. En la actualidad, los dispositivos de carga acoplada (CCD) se encargan de realizar la mayor parte del trabajo. Sus bandas de aplicación abarcan los rayos X, el espectro visible y el infrarrojo cercano hasta una longitud de onda de 2,5 micrómetros. Gracias a ellos, un telescopio de diez metros puede determinar el brillo de un astro de magnitud 28.

EN SÍNTESIS

A simple vista, las variaciones de brillo de las estrellas resultan difíciles de detectar y no pueden medirse de forma objetiva.

Hace un siglo, las primeras células fotoeléctricas permitieron investigar de manera precisa esas fluctuaciones.

La fotometría fotoeléctrica propició el estudio de un tipo de astro casi inexplorado hasta entonces: las estrellas variables.

Sin embargo, los objetos de magnitud inferior a 8 o 9 plantean dificultades a los astrónomos profesionales debido a su elevado flujo de fotones. O, dicho de otro modo, los telescopios actuales son demasiado potentes y los CCD, excesivamente sensibles. En este sentido, los aficionados cuentan con ventaja. Por otro lado, determinar con precisión el brillo de una estrella a partir de mediciones efectuadas desde la superficie terrestre exige hacerlo de forma diferencial; es decir, con respecto a una estrella de referencia que permanezca constante y se localice en el cielo a menos de un grado de distancia de la estrella estudiada. En la mayoría de los casos, sin embargo, tales estrellas brillantes no se encuentran dentro del modesto campo visual de un CCD.

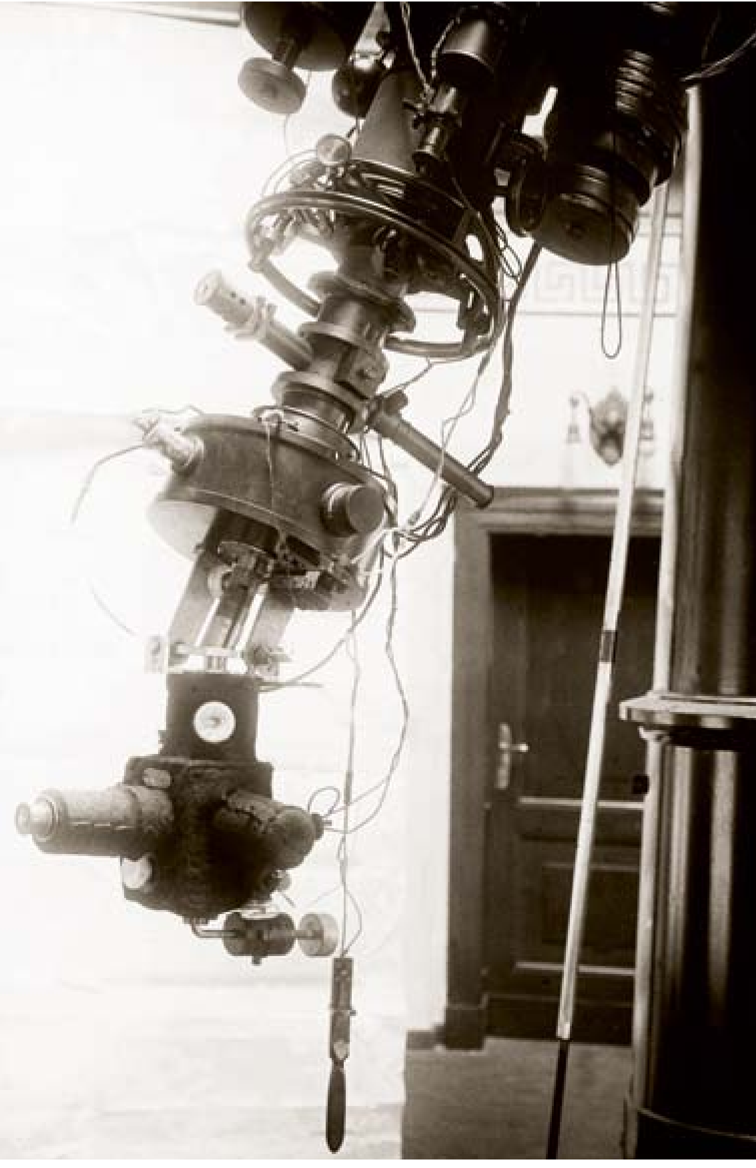
Por esa razón, la observación de estrellas cuyo brillo supera la magnitud 8 o 9 sigue siendo objeto de la fotometría fotoeléctrica basada en fotomultiplicadores. Antes de la popularización de los CCD, dicha técnica dominó la fotometría durante más de cincuenta años. Su consagración llegó a principios de los años treinta del pasado siglo, cuando la Corporación de Radio de América introdujo el fototubo 1P21 (empleado en astronomía desde 1947).

La fotometría fotoeléctrica llevó la electrónica a los observatorios astronómicos. Sus orígenes se remontan a 1893, cuando Julius Elster, físico y profesor de bachillerato, y Hans F. Geitel, físico, desarrollaron en Wolfenbüttel y Berlín un fototubo basado en células alcalinas. Ambos reconocieron desde el principio su posible utilidad para medir el brillo de los astros; sin embargo, los astrónomos de Berlín, Potsdam y Hamburgo prácticamente no mostraron ningún interés.

Hacia 1900, el físico Robert Wichard Pohl y los químicos Hans Kreusler y Hans von Wartenberg llevaron a cabo varios experimentos preliminares sobre el efecto fotoeléctrico, descrito en 1887 por Heinrich Hertz en *Annalen der Physik*. Su explicación física llegó en 1905 de la mano de Albert Einstein, quien más tarde recibiría por ello el premio Nobel de física.

ARCHIVO DEL INSTITUTO LEIBNIZ DE ASTROFÍSICA DE POTSDAM





EL NACIMIENTO DE UNA TÉCNICA: El primer fotómetro fotoeléctrico adaptado a la observación estelar fue instalado por Paul Guthnick en el telescopio refractor Zeiss-Repsold de 30 centímetros (*imágenes*) del Observatorio Real de Berlín-Babelsberg, una de las dos instituciones predecesoras del actual Instituto Leibniz de Astrofísica de Potsdam.

DE LA ELECTRÓNICA A LA ASTRONOMÍA

El uso de hidruros alcalinos había aumentado de manera considerable la sensibilidad de las células fotoeléctricas. En 1910 y 1912, Elster y Geitel se sirvieron de una de ellas para medir el brillo de un eclipse lunar y solar, respectivamente. Demostraron que el número de electrones arrancados del metal como consecuencia del efecto fotoeléctrico era, incluso en condiciones de baja luminosidad, proporcional a la intensidad de la luz.

El primer fotómetro fotoeléctrico adaptado a la observación estelar fue construido por Paul Guthnick, quien lo instaló en el telescopio refractor Zeiss-Repsold de 30 centímetros del Observatorio Real de Berlín-Babelsberg, una de las dos instituciones predecesoras del actual Instituto Leibniz de Astrofísica de Potsdam. Gracias a él, en 1912 tuvieron lugar las dos primeras mediciones fotoeléctricas del brillo de una estrella: Alfa Lyrae (Vega) y Alfa Cygni (Deneb). Hacia la misma época, y de manera independiente, el astrónomo y físico Hans Rosenberg y el físico Edgar Meyer fabricaron en Tubinga un fotómetro fotoeléctrico, aunque nunca llegaron a emplearlo para observar el cielo.

La investigación sistemática de estrellas variables se inició en verano de 1913. El primer astro de este tipo hacia el que Guthnick orientó su dispositivo fue Beta Cephei. El 5 de agosto de ese año, identificó sin dificultad una variación luminosa con una amplitud de apenas 0,05 magnitudes y un período de unas 4,6 horas. Aquello marcó un salto cualitativo con respecto a los resultados registrados por las placas fotográficas habituales, ya que su calidad resultaba entre cinco y seis veces mayor que la obtenida con los fotómetros de selenio empleado hasta entonces.

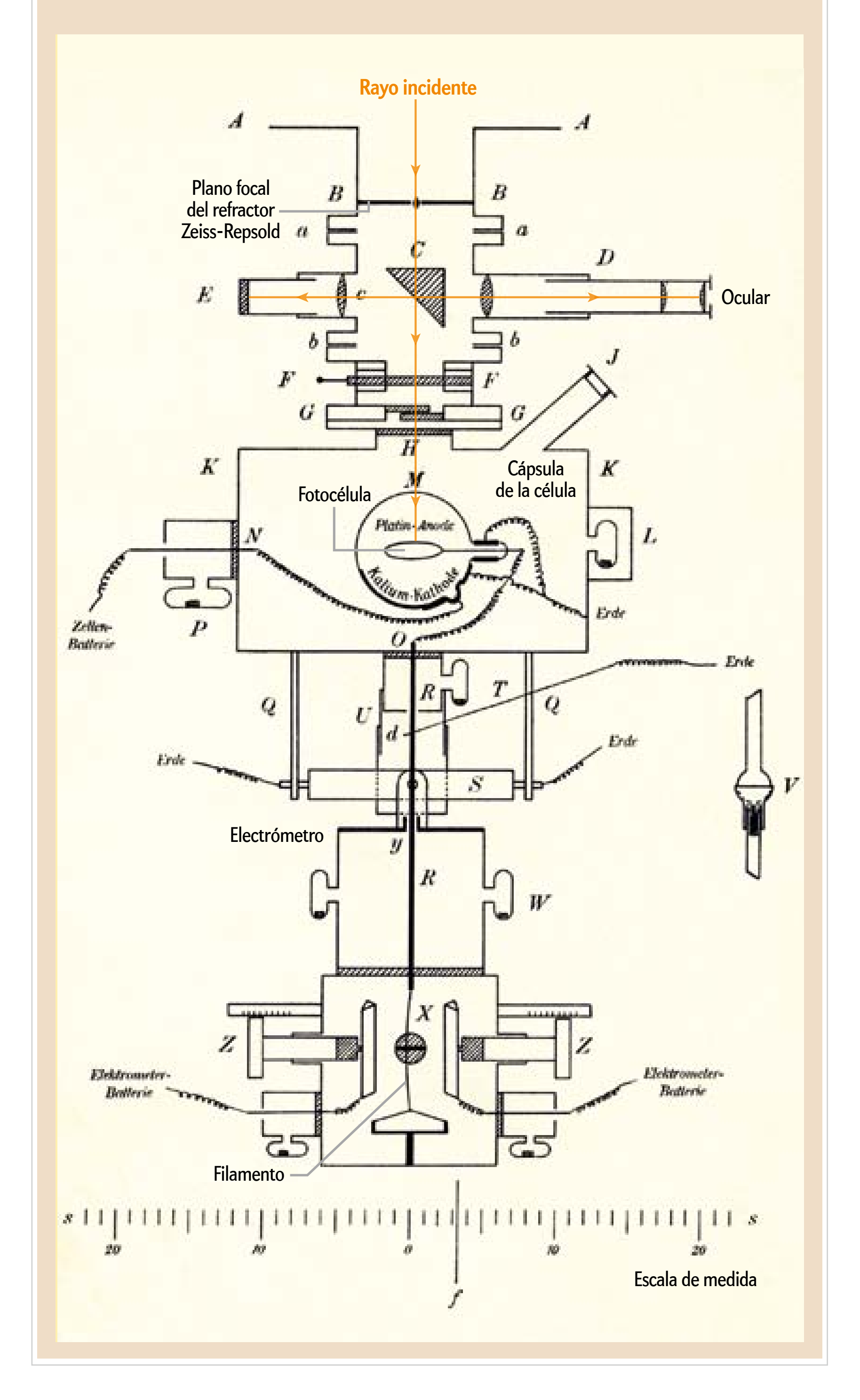
Apenas un año después de las primeras observaciones de Beta Cephei, Guthnick y su colaborador Richard Prager presentaron más de 10.000 mediciones de 43 estrellas. Entre ellas figuraban conocidos astros variables, como la estrella magnética de tipo Ap Alpha2 Canum Venaticorum, con un período de 5,54 días; la estrella caliente de tipo B Ómicron Persei, o la binaria eclipsante de período largo Épsilon Aurigae. Al margen de esas observaciones, obtuvieron también una curva de luz que mostraba la rotación de Marte.

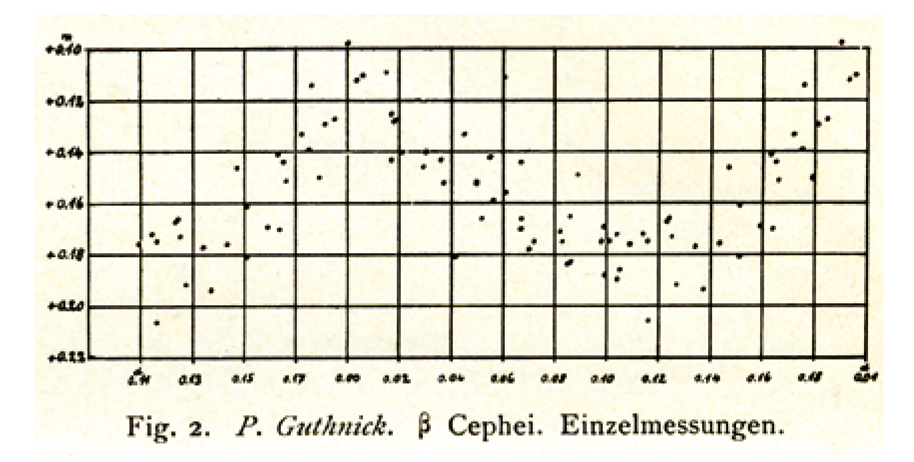
Por aquel entonces, la firma Gühnter & Tegetmeyer, en Brunswick, ya fabricaba

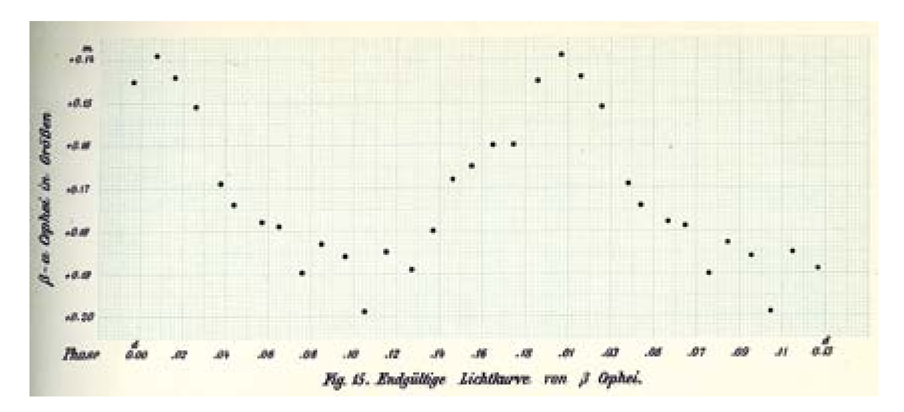
PRIMER FOTOTUBO ASTRONÓMICO

El fotómetro de Guthnick

El dispositivo de Paul Guthnick (***abajo, reproducción del esquema original***) constaba de cuatro partes principales: una cápsula con la célula alcalina, un electrómetro, un ocular y baterías para la célula y el electrómetro. Este último se componía de un hilo conductor situado entre dos placas metálicas. En función del brillo del astro, el filamento se torcía con mayor o menor rapidez. La velocidad de torsión podía leerse con ayuda de un microscopio situado entre dos marcas. La cápsula original empleada por Guthnick contenía argón; incluía un cátodo de potasio y un ánodo de platino con una diferencia de potencial máxima de 140 voltios.







PRIMERAS MEDICIONES DE PRECISIÓN: Guthnick comenzó a estudiar las estrellas variables en verano de 1913. Entre agosto y septiembre trazó las primeras curvas de luminosidad de la variable pulsante Beta Cephei, obtenidas por fotometría diferencial tras sustraer el brillo de Alfa Cephei (*arriba, reproducción de la gráfica original de Guthnick*). A partir de esos datos, a principios de 2014 publicó un artículo en el que aparecía una gráfica mejorada (*abajo*). De sus diagramas se deduce un período de 0,19 días.

fotocélulas con fines comerciales bajo la supervisión de Elster y Geitel. La compañía berlinesa Heele construyó un dispositivo para posicionar la estrella en la zona fotosensible de la célula. Gracias a esos avances, Guthnick y Prager pudieron usar células de sodio y potasio, sensibles al azul-violeta, así como de rubidio y calcio, aptas para el verde-azul-violeta. Sin embargo, mientras que los dispositivos de potasio, rubidio y calcio variaban de forma no lineal con el tiempo y reaccionaban ante los electrones errantes y la radiactividad ambiental, la célula de sodio permanecía estable y apenas generaba corriente de oscuridad. Eso la convirtió en la favorita de Guthnick, quien se valió de ella para la mayor parte de sus mediciones fotométricas. Esas mismas propiedades selectivas le permitieron obtener la primera fotometría en color.

La fotometría ocupó a Paul Guthnick hasta el final de su carrera. El Servicio de Datos Astronómicos de la NASA le reconoce un total de 112 publicaciones, escritas en su mayor parte junto con Prager. Su primer trabajo, aparecido en *Astronomische Nachrichten*, versaba sobre las variaciones de brillo de Kappa Persei. Los dos últimos vieron la luz en 1943. Firmados junto con Heribert Schneller, trataban sobre Ómicron Herculis y Gamma Bootis. El nombre de Paul Guthnick no solo se encuentra íntimamente ligado a la fotometría fotoeléctrica y al estudio de las estrellas variables, sino también a la consolidación del Observatorio de Berlín-Babelsberg como instituto de investigación moderno, así como a los inicios de la exploración fotográfica del cielo y a las primeras investigaciones espectrográficas llevadas a cabo en dicho observatorio.

TRADICIÓN HISTÓRICA

Los orígenes de la fotometría de estrellas datan de muy antiguo. Ya a finales del siglo XVI, antes de la invención del telescopio, el teólogo David Fabricius llevó a cabo algunos de los primeros intentos por determinar a simple vista el brillo de los astros. En el siglo XIX, Friedrich Wilhelm Argelander sentó las bases de un método sistemático que, con el tiempo, ganaría popularidad y recibiría su nombre. Hasta finales del siglo pasado, numerosos aficionados han venido empleando dicha técnica para estudiar las estrellas variables de tipo Mira y comunicar sus mediciones a la Asociación Americana de Observadores de Estrellas Variables.

Durante la segunda mitad del siglo XIX, las placas fotográficas se convirtieron en una herramienta habitual para determinar de manera objetiva el brillo de los astros, si bien para ello era necesario calibrar una relación logarítmica entre la densidad óptica de la placa y la intensidad luminosa.

La primera medición eléctrica del brillo de una estrella fue efectuada a finales del siglo XIX por el irlandés William Monck, filósofo y jurista interesado por la astronomía. Monck, que se crio en las proximidades del castillo de Birr, donde el tercer conde de Rosse había construido un gran reflector de 1,8 metros, tenía instalado en su jardín un pequeño telescopio del fabricante estadounidense Alvan Clark. Por aquella época, George M. Minchin, docente del Trinity College de Dublín, había comenzado a experimentar con ciertas fotocélulas de selenio cristalino inmerso en enantal. No obstante, la luz no desencadenaba en ellas el efecto fotoeléctrico, sino una lenta disminución de la resistencia que podía medirse con un galvanómetro dispuesto en un puente de Wheatstone. El fenómeno había sido descubierto en 1873 por el ingeniero inglés Willoughby Smith. En 1876, el inventor alemán Werner Siemens había construido un primer fototubo basado en dicho principio.

Aunque no han quedado pruebas escritas de ello, las primeras mediciones fotométricas de Monck y Minchin habrían tenido lugar durante la madrugada del 28 de agosto de 1892. La primera observación documentada data de algo más tarde. Fue efectuada en 1895 por Minchin, George F. Fitzgerald y William E. Wilson con el reflector Grubb de 24 pulgadas del Observatorio de Daramona en Westmeath, Irlanda. Sus notas mencionaban explícitamente las dificultades para medir con precisión el brillo de las estrellas de primera y segunda magnitud.

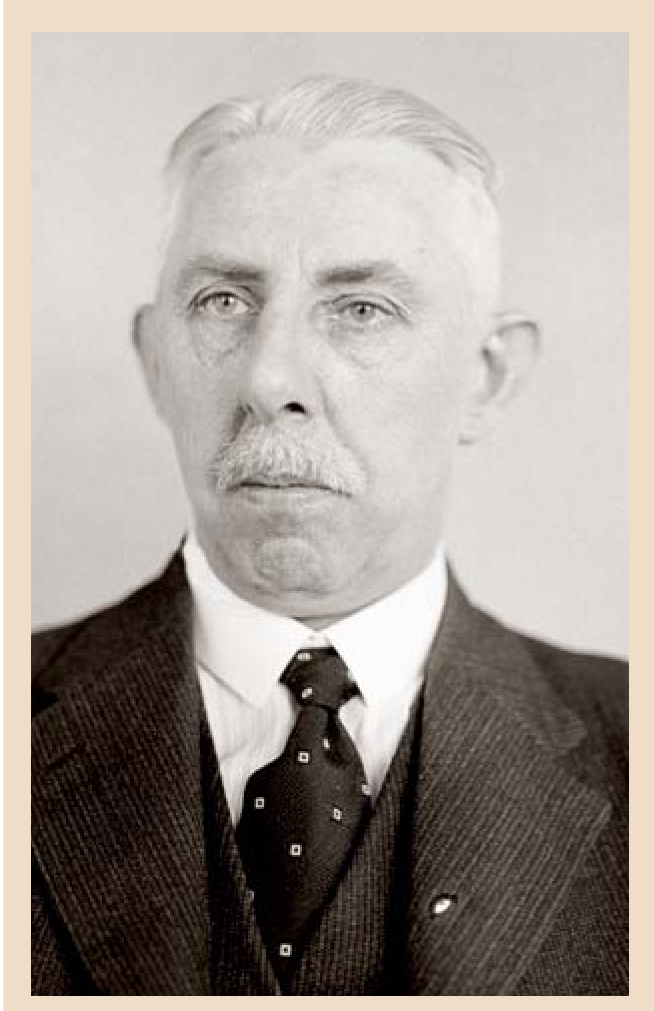
Hacia la misma época, Ernst Ruhmer, uno de los padres de la técnica de la onda portadora, había construido en Berlín su propia célula de selenio. Gracias a ella observó el eclipse par-

ARCHIVO DEL INSTITUTO LEIBNIZ DE ASTROFÍSICA DE POTSDAM

Paul Guthnick (1879-1947)

Paul Guthnick nació el 12 de enero de 1879 en Hitdorf del Rin, hoy un barrio de la ciudad de Leverkusen. Se educó en una familia católica y, a causa de sus dificultades de audición, asistió a un colegio privado en Bonn. En 1888 inició sus estudios de secundaria en el instituto humanístico Kaiser Wilhelm de Colonia. En abril de 1897 comenzó a estudiar matemáticas, ciencias naturales y astronomía en Bonn. El 15 de mayo de 1901 se doctoró con una tesis titulada «Nuevas investigaciones sobre la estrella variable O (Mira) Ceti», dirigida por Friedrich Deichmüller. Su extenso trabajo, con un total de 261 páginas y 25 tablas en las que analizaba todas las observaciones y curvas de luz efectuadas hasta el momento, se publicó en *Nova Acta Academiae Caesareae Leopoldino Carolinae Germanicae Naturae Curiosorum*.

Probablemente por razones económicas, se presentó a un examen público para enseñar física y matemáticas puras y aplicadas en el primer ciclo de bachillerato, así como química y mineralogía en el segundo. En septiembre de 1901 fue destinado al instituto de secundaria de la Iglesia apostólica de Colonia, pero ya en noviembre del mismo año renunció a su puesto para convertirse en asistente del astrónomo Arthur von Auwers en el Observatorio de Berlín. En abril de 1903, y por recomendación de Auwers, Guthnick comenzó a trabajar en el observatorio privado del gobernador Carl Friedrich Gustav von Bülow, cerca de Kiel, labor que interrumpió durante un año para realizar el servicio militar.



Paul Guthnick aplicó la fotometría fotoeléctrica a la astronomía y adaptó dicha técnica a la observación celeste. Gracias a ello nació un nuevo campo de investigación: el estudio cuantitativo de las estrellas variables.

GALERÍA DEL INSTITUTO LEIBNIZ DE ASTROFÍSICA DE POTSDAM

El 1 de abril de 1906 fue nombrado miembro del Observatorio de Berlín, institución en la que permaneció hasta el final de su carrera. Por encargo del Ministerio de Educación, una de sus primeras tareas consistió en efectuar observaciones preliminares en Babelsberg, un distrito de Potsdam, a fin de evaluar la conveniencia de trasladar allí el observatorio. Dadas las buenas características del lugar y su cercanía a Berlín, se consideró un emplazamiento ideal.

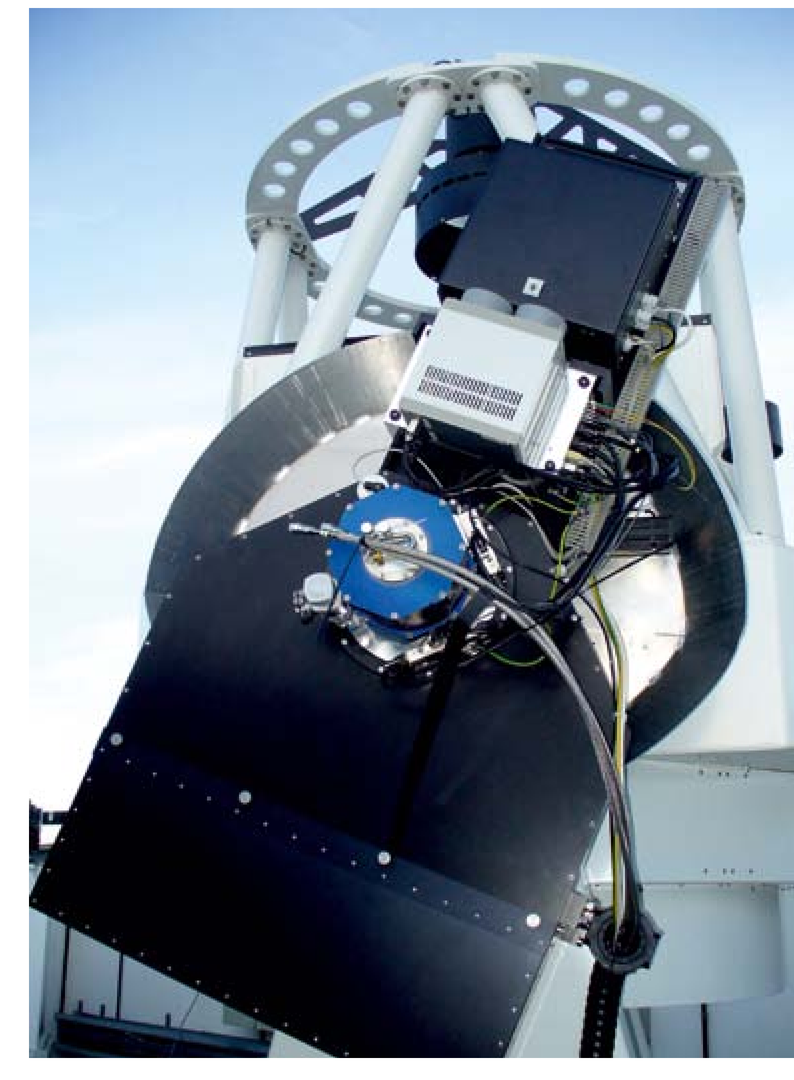
Guthnick obtuvo su cátedra en 1914. Dos años después, fue designado catedrático extraordinario de astrofísica de la Universidad Friedrich-Wilhelm de Berlín. Tras la muerte de Karl Hermann von Struve fue nombrado director del Observatorio Universitario de Berlín-Babelsberg y profesor de astronomía práctica en la Universidad de Berlín. Al igual que Struve, Guthnick fue elegido poco después miembro numerario de la Academia Prusiana de las Ciencias. Continuó con el proyecto iniciado por Struve hasta convertir el observatorio en una de las instituciones astronómicas mejor equipadas del mundo. Si Struve había suministrado excelentes instrumentos a la sección de astrometría, Guthnick se encargó de que la sección astrofísica satisficiera las exigencias de la época.

El investigador fue durante años miembro activo de la junta directiva de la Sociedad Astronómica Alemana, donde ocupó el cargo de secretario desde 1924 hasta 1933. Presidió también la comisión de estrellas variables; por aquel entonces, la única de la institución con fines astrofísicos. Entre otras funciones, esta se ocupaba de la edición y revisión de *Geschichte und Literatur des Lichtwechsels der Veränderlichen Sterne* («Historia y literatura de los cambios de luz de las estrellas variables»).

Guthnick fue también miembro de la Unión Astronómica Internacional, fundada en 1919, así como de sus comisiones sobre fotometría, estrellas variables y velocidades radiales. Desde 1924 ejerció como corresponsal de la Pontificia Academia de los Nuevos Linces de Roma. En los años siguientes fue nombrado miembro de la Sociedad Real Astronómica de Londres, la Academia de Ciencias de Baviera, la Academia Leopoldina de Investigadores de Ciencias Naturales y la Real Sociedad de Ciencias de Uppsala. En 1942 obtuvo el título de doctor honoris causa por la Universidad de Padua. También proyectó la construcción de un observatorio astronómico en el hemisferio sur cerca de Windhoek, en la actual Namibia.

Casado y con dos hijos, falleció en Berlín el 6 de septiembre de 1947. En 1970, la Unión Astronómica Internacional bautizó con su nombre el cráter lunar de coordenadas 47° 42’ 0” sur y 93° 54’ 0” oeste, de 36 kilómetros de diámetro.





FOTOMETRÍA MODERNA: El telescopio robótico STELLA (*arriba*), del Instituto Leibniz de Astrofísica de Postdam, observa el cielo desde las instalaciones que este centro tiene en Tenerife. Sus objetivos incluyen la fotometría de gran angular de estrellas variables. El fotómetro del experimento (*derecha*) ofrece un campo visual de 22 × 22 minutos de arco, con píxeles de 0,32 segundos de arco.

INSTITUTO LEIBNIZ DE ASTROFÍSICA DE POTSDAM

cial de Sol del 31 de octubre de 1902, así como el eclipse casi total de Luna que tuvo lugar en la noche del 11 al 12 de abril de 1903. Junto con el electromecánico francés Eugène Augustin Lauste, Ruhmer ganaría fama por desarrollar la técnica de grabación fotográfica del sonido, empleada más tarde en la industria del cine.

A finales del siglo XIX, el investigador de la Universidad de Illinois Fay C. Brown había fabricado una célula de selenio que aprovechaba el efecto fotoconductor por medio de una bobina (dado que en aquella época resultaba imposible obtener selenio puro, cada célula era distinta aunque el material procediese de la misma fundición). Poco después, el astrónomo estadounidense Joel Stebbins propuso emplear la técnica en astronomía. En colaboración con Brown, en 1907 orientó hacia Júpiter un fotómetro instalado en el refractor de 12 pulgadas del Observatorio Lick de la Universidad de California. Por desgracia sin éxito, ya que el instrumento carecía de la sensibilidad necesaria. Solo la Luna en su fase llena provocaba la reacción de la célula de selenio. Más tarde, esta fue empleada para medir el brillo del cometa Halley y el de las estrellas Delta Cephei y Beta Persei (Algol).

A la sazón, otros dos investigadores de Illinois ya tenían conocimiento de la célula alcalina de Elster y Geitel. El suizo Jakob Kunz había presenciado en Brunswick el proceso de fabricación de una de las células de Gühnter & Tegetmeyer, por lo que más tarde elaboró un dispositivo análogo con ayuda de William Frederick Schulz, quien en diciembre de 1912 lo empleó para medir el brillo de Alfa Aurigae (Capella) y, en abril de 1913, el de Alfa Bootis (Arturo). Sin embargo, aunque el investigador anotó las desviaciones que ambas estrellas provocaban en la aguja en el electrómetro, no dedujo su brillo.

EL LEGADO DE GUTHNIK

La novedad llegó a oídos de Stebbins, quien desde 1913 hizo lo posible por sustituir la célula de selenio de Brown por el dispositivo fotoeléctrico de Kunz y Schulz, mucho más sensible. Su fotómetro se inspiró en el de Guthnick, tal y como él mismo reconoció en la introducción de su trabajo. En 1912, durante un año sabático, Stebbins visitó a Guthnick en Berlín y aprovechó para familiarizarse con su método. El 21 de junio de 1915, empleó su nuevo dispositivo para efectuar, con el refractor Lick de 12 pulgadas instalado en la cima del monte Hamilton, una primera serie de mediciones de Beta Lyrae. A partir de 1918, sus observaciones dieron lugar a una serie de trabajos escritos junto con Schulz y «Jacob» (adaptado a la grafía inglesa) Kunz.

Hasta los albores de la Segunda Guerra Mundial, Kunz abasteció de células fotoeléctricas al mercado estadounidense.

Richard Prager (1883-1945)

Richard Prager nació el 30 de noviembre de 1883 en Hanóver. Estudió matemáticas, física y astronomía en Marburgo, Gotinga y Berlín. Entre sus profesores figuraron Julius Bauschinger, Walther Nernst, Hermann Minkowski, Max Planck y Karl Schwarzschild. En 1908 se doctoró en Berlín bajo la dirección de Karl Hermann von Struve con una tesis sobre la órbita de Hiperión, el séptimo satélite de Saturno, que dedicó a su madre.

Prager trabajó como asistente en la Academia Prusiana de las Ciencias de Berlín. Lo hizo en el departamento de historia de las estrellas fijas, dirigido por Friedrich Wilhelm Ristenpart. En 1909 siguió a Ristenpart hasta Chile, donde ejerció como jefe de sección en el Observatorio Nacional de Santiago de Chile. Bajo su dirección se encontraban el departamento ecuatorial y el de cálculo, encargados de llevar a cabo las correcciones cartográficas necesarias para elaborar un mapa fotográfico del cielo. En 1913, tras la muerte de Ristenpart, regresó a Alemania, donde se incorporó al observatorio de Berlín-Babelsberg en calidad de asistente. En 1916 fue nombrado observador y, en 1924, catedrático.

Sus investigaciones se centraron en el estudio de las estrellas variables. Junto con Guthnick, se dedicó a perfeccionar la fotometría fotoeléctrica. A partir de 1918 se encargó de la observación de las estrellas de referencia correspondientes a la zona de Potsdam para elaborar un mapa fotográfico del cielo, un catálogo de 8303 estrellas publicado en 1923, así como otro de 1885 estrellas para el equinoccio de 1925 que vio la luz en 1924.



Estrecho colaborador de Paul Guthnick, Richard Prager se vio obligado a emigrar de Alemania a causa de su origen judío.

Prager fue coeditor de las publicaciones del Observatorio Astronómico de Berlín-Babelsberg, así como responsable de otras revistas menores. Puso su gran talento y capacidad de trabajo a disposición de la Sociedad Astronómica Alemana, que en 1926 le encargó la única edición del *Katalog und Ephemeriden Veränderlicher Sterne* («Catálogo y efemérides de estrellas variables»). Desde 1930 y hasta 1936 fue secretario de la Sociedad Astronómica Alemana, donde se le confió la publicación de su revista trimestral. Por aquella época comenzó la nueva edición de *Geschichte und Literatur des Lichtwechsels der Veränderlichen Sterne* («Historia y literatura de los cambios de luz de las estrellas variables»).

En 1935 Prager perdió su puesto a causa de su origen judío. Con grandes esfuerzos, Guthnick logró que permaneciese en el observatorio hasta 1937 como colaborador externo, aunque en 1936 se vio obligado a renunciar a su cargo como secretario de la Sociedad Astronómica Alemana. Finalmente, emigró a Inglaterra en 1938.

A partir de abril de 1939 impartió clases en Harvard y se incorporó a su observatorio, donde continuó con su trabajo en el campo de las estrellas variables. En 1941 publicó un suplemento en *Geschichte und Literatur* sobre 3592 estrellas variables. Falleció en 1945 en Cambridge, Massachusetts, tras luchar contra una larga enfermedad.

El resto del mundo, Rusia incluida, las obtenía de Günther & Tegetmeyer. Así fue como consiguieron sus instrumentos varios pioneros de la fotometría astronómica como Stebbins, la investigadora de Wisconsin Edith Cummings, el astrónomo del Observatorio Lick Gerald Kron, o Christian Elvey, del Observatorio Yerkes de la Universidad Yale.

Un siglo después de los trabajos fundacionales de Guthnick, la fotometría sigue ocupando a los investigadores de Babelsberg. Los fototubos han sido reemplazados en su mayor parte por detectores basados en CCD, los cuales se emplean para medir con regularidad el brillo en rayos X de las estrellas binarias de período corto con el reflector de 70 centímetros del observatorio, casi siempre en colaboración con astrónomos aficionados.

Los instrumentos de precisión del Instituto Leibniz de Astrofísica se alojan en las instalaciones que el centro posee en Tenerife, donde un emplazamiento a 2400 metros sobre el nivel del mar garantiza una baja contaminación lumínica y humedad del aire. En sus aspectos esenciales, el telescopio de 1,2 metros STELLA continúa operando igual que en tiempos de Guthnick y Prager. Pero, en lugar de las cien estrellas que estos investigadores midieron a lo largo de su vida, el instrumento observa miles de astros cada pocos minutos incluso en ausencia de astrónomos o técnicos. La diferencia: cien años de desarrollo tecnológico.

PARA SABER MÁS

The measurement of starlight: Two centuries of astronomical photometry. J. B. Hearnshaw. Cambridge University Press, 2005.

100 Jahre Astronomie auf dem Babelsberg. H.-E Fröhlich en *Sterne und Weltraum*, págs. 40-49, agosto de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Avistando variables cefeidas. George A. Carlson en *IyC*, enero de 1993.

por H. Joachim Schlichting



H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto para Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

La catástrofe del café para llevar

¡Cuidado con las resonancias! Al caminar con un vaso en la mano, tendemos instintivamente a hacer justo lo contrario de lo que deberíamos para que el líquido no se derrame

En nuestra época resulta impensable vivir sin café para llevar. Es común ver a gente transportar la bebida en un vaso de papel o plástico en estaciones de tren, zonas peatonales, pasillos de oficina o salas de reuniones. Sin embargo, evitar los accidentes requiere ciertas destrezas motoras y, a menudo, nos obliga a adoptar una postura nada natural. Aunque los fabricantes han reaccionado a tales contratiempos proveyéndonos de recipientes con tapa, el líquido del interior sigue obedeciendo las leyes de la física.

Por corrientes que nos parezcan, los procesos que tienen lugar mientras caminamos revisten cierta complejidad. Por ejemplo, los estudios biomecánicos han mostrado que las personas que andan con un destino predeterminado suelen minimizar su gasto energético; para ello, evitan los movimientos hacia los lados y reducen al mínimo la elevación y el descenso del cuerpo.

Las complicaciones aparecen debido a que las piernas ejecutan un movimiento muy similar al de un péndulo. Este se transmite a todo el cuerpo, si bien nuestras extremidades inferiores se encargan de acelerarlo o frenarlo con independencia de la frecuencia de oscilación, la masa y la dirección de movimiento. Según un estudio empírico en el que se analizó la forma de caminar de cien individuos en situaciones diversas, la frecuencia de dicho movimiento pendular varía entre 1,4 y 2 hercios: un resultado parecido al que obtendríamos si, con algunas salvedades, tratásemos las piernas como un péndulo físico y determinásemos su frecuencia mediante la fórmula correspondiente.

Si observamos con detalle la manera en que una persona suele transportar un vaso lleno, comprobaremos que tiende a evitar cualquier movimiento innecesario con las manos. El envase se encuentra firmemente unido al brazo y, por ende, al cuerpo, de modo que oscilará con su misma frecuencia. Ello obedece a nuestros esfuerzos por suprimir uno de los grados de libertad del movimiento; con la esperanza, más o menos consciente, de controlar mejor la situación. La recompensa, sin embargo, no siempre llega. Cuando comenzamos a andar con la taza, la inercia provocará que, en un primer momento, el líquido permanezca en reposo con respecto al recipiente. Sin embargo, empezará a oscilar al primer choque contra las paredes.

La respuesta a la pregunta de si las oscilaciones del café aumentarán o no depende de la frecuencia natural de oscilación del líquido. Se trata del mismo fenómeno que tiene lugar cuando impulsamos a un niño que juega en un columpio: para que se balancee de la manera adecuada, deberemos empujar cuando la silla se encuentre en reposo; es decir, cuando se invierta el sentido de su movimiento. El impulso resultará óptimo si su frecuencia coincide con la del columpio y la diferencia de fase entre ambos asciende a $\pi/2$. En el caso del café, el desfase «correcto» se produce de manera automática al empezar a andar. Después, sin embargo, el líquido solo oscilará si su frecuencia propia se ve acompañada por la de nuestros andares.

EL CAFÉ no se derrama porque descuidemos nuestra manera de andar. Debido a la frecuencia natural de la bebida en un recipiente con las dimensiones habituales, el líquido entrará fácilmente en resonancia con nuestro paso.

Resonancias cotidianas

Dicha condición se satisface la mayor parte de las veces. Ello se debe a que, en los recipientes habituales, la frecuencia natural del líquido se halla entre 2,6 y 4,3 hercios. El valor concreto dependerá del diámetro de la taza y de la altura del líquido; pero, en cualquier caso, rondará el doble de la frecuencia característica del andar de una persona. Eso quiere decir que, por cada paso que damos, el líquido completará una ida y una vuelta. De modo que, al igual que en el caso del columpio, el café se encuentra en la misma posición cada vez que nos disponemos a iniciar el siguiente paso.

Las consecuencias saltan a la vista. Aunque al principio intentemos excitar el líquido lo menos posible, tras varias zancadas —y a menos que el vaso se encuentre casi vacío— experimentaremos una resonancia catastrófica. El café no se derrama porque nos relajemos y descuidemos el control del movimiento. Antes bien, se trata de una consecuencia inevitable de avanzar con la frecuencia y la fase «adecuadas».

¿Qué hacer para evitarlo? Por supuesto, una posibilidad consistiría en modificar las dimensiones de vasos y tazas a fin de alterar la frecuencia natural de oscilación del líquido. Sin embargo, para ello no bastarían pequeños ajustes; sería ne-



THINKSTOCK/OKEA





PARA EVITAR que el café se derrame, no deberíamos mantener la mano pegada al cuerpo. Existen mejores maneras de lograrlo, aunque tal vez no muy aptas para el día a día: como muestran estas fotografías, las oscilaciones de una bandeja pendular pueden conseguir que el líquido permanezca en reposo con respecto al recipiente.

CORTESÍA DEL AUTOR

cesario introducir grandes cambios en el diámetro o la altura de los recipientes. En este sentido, podemos considerar el tamaño y la forma de nuestros envases como una constante cultural. Y, de igual modo, no parece probable que nos acostumbremos a alterar demasiado la frecuencia de nuestros pasos cuando transportamos un vaso de papel.

Con todo, existe una solución que, a primera vista, podría parecer paradójica: añadir grados de libertad al movimiento, en lugar de eliminarlos. Si situamos nuestro vaso sobre una tabla sujeta a un par de cuerdas y movemos la mano de la forma adecuada, podremos amplificar las oscilaciones del péndulo en lugar de oponernos a ellas y, de esta manera, hacer que el líquido permanezca prácticamente en reposo con respecto al recipiente.

La razón para ello debemos buscarla en la inercia. Todo cuerpo tiende a conservar un movimiento en línea recta y a velocidad constante. En el caso de nuestro péndulo, este se ve atraído hacia el centro de giro; es decir, en una dirección perpendicular a aquella en la que tendería a moverse por efecto de la inercia. El fondo del vaso empuja el café hacia el interior de la circunferencia y, al mismo tiempo, el líquido ejerce una fuerza de igual magnitud y sentido contrario sobre el fondo, lo que asegura que se mantendrá dentro del recipiente. Incluso en el caso de oscilaciones pequeñas, las fuerzas que intervienen presentan tal magnitud que cualquier perturbación producida por nuestra forma de andar carecerá de importancia.

Estas consideraciones van más allá de la contemplación teórica. En los países árabes, por ejemplo, podremos ver algunas bandejas pendulares para bebidas. Y, de igual modo, los aparatosos balanceos que en ocasiones ejecutan los camareros no buscan tanto llamar la atención de los comensales como evitar que la sopa o las bebidas se viertan debido a una resonancia catastrófica.

Hace poco más de dos años, el problema del derramamiento del café fue objeto de un artículo publicado en la prestigiosa *Physical Review E*. En él, Rouslan Krechetnikov y Hans Mayer, de la Universidad de California en Santa Bárbara, desarrollaron un modelo matemático para describir el transporte de bebidas [*véase* «Dinámica de fluidos en una taza de café», por Charles Q. Choi; Investigación y Ciencia, febrero de 2012]. Debido a lo singular de su trabajo, los autores fueron galardonados en 2012 con uno de los célebres premios Ig Nobel.

Al transportar líquidos en camiones, barcos, aviones o cohetes, las oscilaciones pueden llegar a desestabilizar el vehículo, con consecuencias impredecibles. Los expertos llevan décadas estudiando el problema y sus posibles soluciones; entre ellas, dividir los tanques de transporte en cámaras separadas por diques a fin de evitar que oscilen grandes masas de líquido.

PARA SABER MÁS

A study on sloshing frequencies of fluid-tank system. O. R. Jaiswal et al. en *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Pekín, octubre de 2008.

Walking with coffee: Why does it spill? H. C. Mayer y R. Krechetnikov en *Physical Review E*, vol. 85, pág. 046117, 26 de abril de 2012.

por Alejandro Pérez Carballo

Alejandro Pérez Carballo es profesor de filosofía en la Universidad de Massachusetts en Amherst.



Lenguaje, convenciones y coordinación (2)

El problema de la evolución de los códigos

En la columna de noviembre, la observación de que el lenguaje parece basado en convenciones nos llevó a preguntarnos cómo dos personas que carecen de un código común pueden llegar a desarrollar uno. Para analizar la cuestión, propusimos el siguiente juego de coordinación simple.

Eva y Fabio se encuentran separados por un edificio en el que hay dos pares de puertas enfrentadas: dos rojas y dos azules. Entre uno de esos pares de puertas hay una jirafa escondida. Nuestros amigos ganan el juego si Fabio abre la puerta tras la cual se encuentra la jirafa. Para ello, Eva intentará ayudarle de la siguiente manera: tras abrir las dos puertas y ver dónde se halla el animal, elegirá una de entre dos palabras de significado desconocido para ambos, *kùla* y *pulú*. Una vez que Eva pronuncie en voz alta la palabra escogida, Fabio procederá a abrir una de las puertas. Si encuentra la jirafa, cada uno de ellos obtendrá cien euros; en caso contrario, ambos se irán con las manos vacías.

Antes de iniciar el juego, Eva debe elegir la manera de emplear las palabras *kùla* y *pulú*. Por su parte, Fabio ha de decidir cómo interpretarlas. Podemos representar las opciones de cada uno de la siguiente manera:

$r \leftrightarrow k$: asociar *kùla* con el color rojo y *pulú* con el azul.
$r \leftrightarrow p$: asociar *pulú* con el color rojo y *kùla* con el azul.

La matriz de recompensas de Eva y Fabio viene dada por la siguiente tabla, donde cada celda indica la probabilidad de que ambos ganen cien euros si se deciden por las estrategias correspondientes:

	$r \leftrightarrow k$	$r \leftrightarrow p$
$r \leftrightarrow k$	1	0
$r \leftrightarrow p$	0	1

Vemos que, para ganar, Eva y Fabio deben coordinarse sobre cómo usar las palabras *kùla* y *pulú*. El problema reside en cómo lograrlo si no disponen de antemano de un código común.

Aprender del éxito

Por supuesto, no hay nada que nuestros amigos puedan hacer para garantizar la coordinación. Supongamos, sin embargo, que se les permite jugar un gran número de veces. ¿Podrán entonces llegar a un acuerdo aun sin comunicarse?

Imaginemos que, en cada ronda, la posición de la jirafa se determina al azar. Al igual que antes, Eva y Fabio ganarán cien euros en cada etapa si Fabio abre la puerta tras la cual se encuentra la jirafa. Sin embargo, ahora cada uno de ellos determinará su jugada sirviéndose de dos urnas. Las de Eva están pintadas de rojo y azul, y en cada una de ellas hay bolas de dos tipos: unas con la letra K y otras con la letra P. Por su parte, las urnas de Fabio están rotuladas con las letras K y P, y ambas contienen una mezcla de bolas azules y rojas.

En la primera ronda, al ver tras qué puerta se esconde la jirafa, Eva extraerá al azar una bola de la urna del color correspondiente. Si obtiene una bola con la letra K, pronunciará *kùla*; en caso contrario, dirá *pulú*. Acto seguido, Fabio se dirigirá a la urna rotulada con la inicial de la palabra pronunciada por Eva. Tomará una bola y, en función de su color, abrirá la puerta correspondiente.

Al concluir la etapa, Eva y Fabio devolverán cada bola a su urna. Pero, además, si finalizan esa ronda con éxito (esto es, si Fabio abre la puerta tras la cual se hallaba la jirafa), cada uno añadirá a la urna en cuestión una bola idéntica a la que había extraído. Nótese que esta estrategia incentiva la coordinación, ya que aumenta la probabilidad de que, en el futuro, Fabio y Eva asocien la misma palabra al mismo color (*véase la figura*).

Si este proceso se repite una y otra vez, puede demostrarse que la probabilidad de que Eva y Fabio acaben ganando en todas las rondas tiende a uno. Dicho de otro modo, a medida que transcurran las etapas, las urnas de Eva y Fabio se acercarán cada vez más a una de las dos configuraciones siguientes:

(1) La urna azul solo contiene bolas marcadas con la letra K; la roja solo incluye bolas con la letra P; la urna rotulada con la letra K solo tiene bolas azules, y la marcada con una P solo guarda bolas rojas.
(2) La urna azul solo contiene bolas con la letra P; la roja solo bolas con la letra K; la urna marcada con una P solo guarda bolas azules, y la marcada con una K solo incluye bolas rojas.

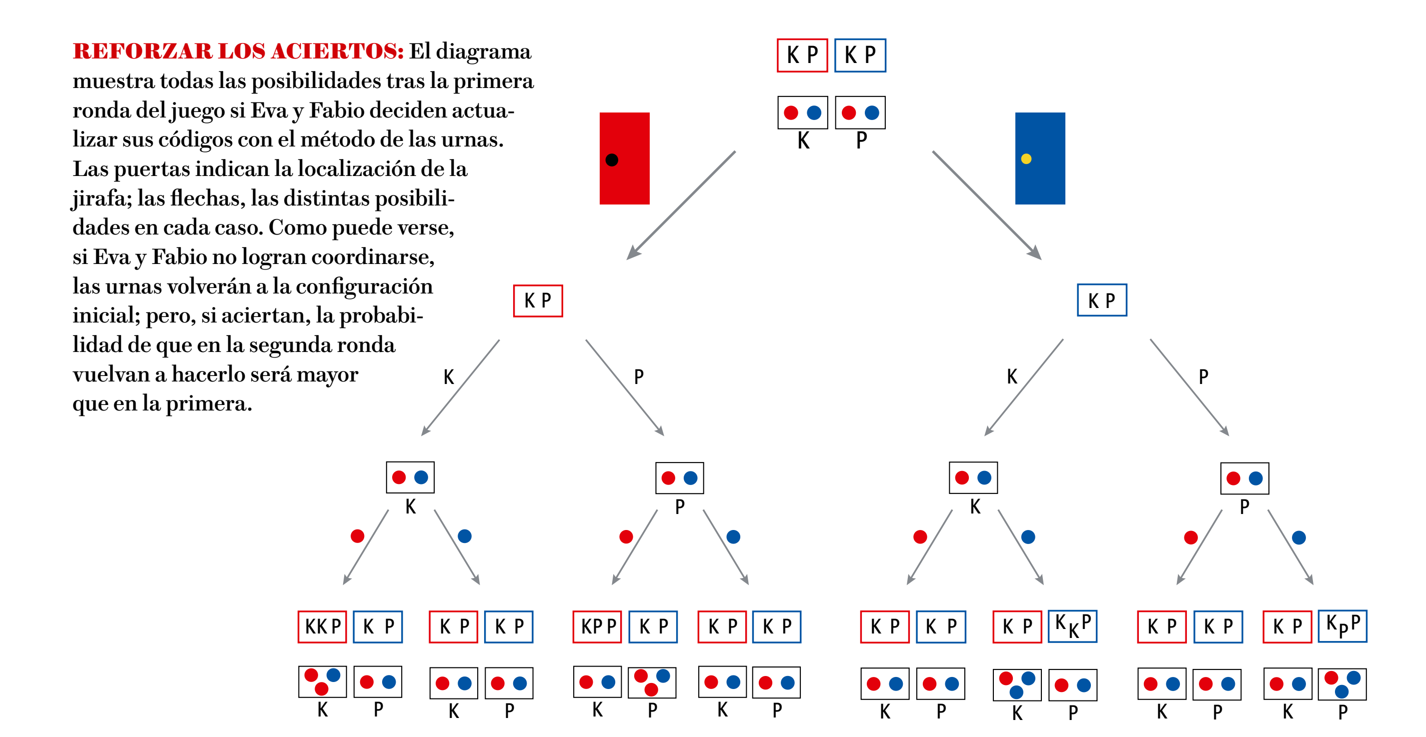
Por desgracia, si aumentamos el número de puertas (así como el de palabras disponibles), la estrategia anterior ya no garantiza una evolución hacia la coordinación total. Por ejemplo, si partimos de tres colores (c_1, c_2 y c_3) y tres palabras (p_1, p_2, y p_3), cabe la posibilidad de que el código empleado por nuestros amigos acabe asentándose en una asignación como la siguiente:

Eva: $c_1 \to p_1$, $c_2 \to p_1$, $c_3 \to p_3$
Fabio: $p_1 \to c_1$, $p_2 \to c_3$, $p_3 \to c_3$

En este caso, Eva nunca emplea la palabra p_2, por lo que no importa lo que Fabio piense al respecto. Y si bien parece razonable pensar que p_3 se refiere al color c_3, no queda claro qué significan p_1 y p_2.

Aprender del fracaso

La estrategia anterior puede fallar porque no incluye ningún mecanismo que obligue a probar con un código nuevo en caso



REFORZAR LOS ACIERTOS: El diagrama muestra todas las posibilidades tras la primera ronda del juego si Eva y Fabio deciden actualizar sus códigos con el método de las urnas. Las puertas indican la localización de la jirafa; las flechas, las distintas posibilidades en cada caso. Como puede verse, si Eva y Fabio no logran coordinarse, las urnas volverán a la configuración inicial; pero, si aciertan, la probabilidad de que en la segunda ronda vuelvan a hacerlo será mayor que en la primera.

CORTESÍA DEL AUTOR

de error. Consideremos, pues, una versión diferente del juego.

Imaginemos que hay N puertas, cada una pintada de uno de los colores c_1, c_2, ..., c_N, así como N palabras, las cuales denotaremos p_1, p_2, ..., p_N.

En la etapa número m, Eva debe escoger una función

$$e_m : \bar{N} \to \bar{N} \, ,$$

donde $\bar{N}$ representa el conjunto de los números naturales de 1 a N: $\bar{N} = \{1, 2, ..., N\}$. Esta función determinará qué palabra asocia Eva a cada color c_i, según la regla:

$$c_i \to p_{e_m(i)} \, .$$

De igual modo, antes de comenzar a jugar la ronda m-ésima, Fabio deberá elegir una función

$$f_m : \bar{N} \to \bar{N} \, ,$$

la cual establecerá qué color asignará Fabio a cada palabra p_i: $p_i \to c_{f_m(i)}$. Notemos que, si en la etapa m la jirafa se encuentra tras la puerta de color c_{j^*}, Eva y Fabio ganarán cien euros cada uno si y solo si $f_m(e_m(j^*)) = j^*$.

Ahora, Eva y Fabio adoptarán la siguiente estrategia. Si ganan en la ronda m-ésima, en la etapa siguiente elegirán las mismas funciones: $e_{m+1} = e_m$ y $f_{m+1} = f_m$. En caso contrario, si la jirafa se encontraba tras la puerta de color c_{j^*}, nuestros amigos actualizarán sus funciones de acuerdo con las siguientes reglas:

(e) Eva tomará $e_{m+1}(i) = e_m(i)$ para todo $i \neq j^*$, y determinará el valor de $e_{m+1}(j^*)$ mediante un número entre 1 y N elegido al azar.

(f) Fabio tomará $f_{m+1}(i) = f_m(i)$ para todo $i \neq e_m(j^*)$, y determinará el valor de $f_{m+1}(e_m(j^*))$ mediante un número entre 1 y N escogido al azar (de manera independiente).

Eva y Fabio lograrán la coordinación absoluta en la etapa m-ésima si y solo si $f_m(e_m(i)) = i$ para todo i. En tal caso, ganarán cien euros en esa ronda sin importar dónde se encuentre la jirafa. Y, dado que la estrategia adoptada implica no modificar las funciones en caso de éxito, si logran la coordinación absoluta en una etapa seguirán coordinados en todas las siguientes.

Códigos en evolución

Veamos ahora que, sin importar con qué función comiencen Eva y Fabio, antes o después alcanzarán la coordinación absoluta. Llamemos $e_m[\bar{N}]$ a la imagen de la función e_m; es decir, al conjunto de valores que esta toma:

$$e_m[\bar{N}] = \{e_m(i) : 1 \leq i \leq N\} \, .$$

Observemos que, si $e_m[\bar{N}] \neq \bar{N}$, entonces la probabilidad de que $e_{m+1}[\bar{N}]$ contenga más elementos que el conjunto $e_m[\bar{N}]$ es mayor que cero.

Para ver por qué, notemos primero que $e_m[\bar{N}] \neq \bar{N}$ ocurre si y solo si Eva ha asociado dos o más colores a una misma palabra. Es decir, existen al menos dos números k y l (comprendidos entre 1 y N) tales que $k \neq l$ y $e_m(k) = e_m(l)$. A su vez, esto implica que al menos uno de ellos, al que llamaremos k^*, cumple que $f_m(e_m(k^*)) \neq k^*$.

Por otro lado, es obvio que la probabilidad de que el siguiente enunciado sea cierto:

(J_{k^*}) La jirafa se halla tras la puerta de color c_{k^*}

es mayor que cero en cualquier ronda. Si eso sucede (y dado que $f_m(e_m(k^*)) \neq k^*$), Fabio abrirá la puerta equivocada, lo que obligará a nuestros amigos a actualizar su código en la ronda siguiente. Por tanto, dado (J_{k^*}), el siguiente enunciado cuenta también con una probabilidad mayor que cero de ser cierto:

$$(A) \quad e_{m+1}(k^*) \notin e_m[\bar{N}] \, .$$

Nótese que (A) implica que el número de elementos de $e_{m+1}[\bar{N}]$ es mayor que el de $e_m[\bar{N}]$. Ahora bien, si la probabilidad de que ocurra (J_{k^*}) es mayor que cero, y, dado (J_{k^*}), la probabilidad de que (A) suceda es también mayor que cero, entonces la probabilidad de que (J_{k^*}) y (A) ocurran será siempre mayor que cero. Y si eso puede suceder una vez, entonces la probabilidad de que suceda lo mismo varias veces seguidas también será distinta de cero.

Así pues, si $e_m[\bar{N}] \neq \bar{N}$, sabemos que tarde o temprano llegará una ronda $M > m$

en la que $e_M[\overline{N}] = \overline{N}$. Es decir, con probabilidad uno, Eva acabará usando todas las palabras que tiene a su disposición para designar colores distintos.

Supongamos ahora que $e_M[\overline{N}] = \overline{N}$ y llamemos δ_M al número de elementos tales que $f_M(e_M(i)) \neq i$ (es decir, el número de colores a los que Fabio asigna palabras distintas que Eva). Si $\delta_M = 0$, entonces nuestros amigos habrán alcanzado la coordinación absoluta. En caso contrario, escojamos un k^* tal que $f_M(e_M(k^*)) \neq k^*$.

Al igual que antes, la probabilidad de que ocurra (J_{k^*}) (que la jirafa se halle tras la puerta de color c_{k^*}) es mayor que cero. Notemos también que, dado (J_{k^*}), la probabilidad de que ocurra cada uno de los enunciados siguientes es también mayor que cero:

$(B)\quad e_{M+1}(k^*) = e_M(k^*)$
$(C)\quad f_{M+1}(e_M(k^*)) = k^*$

Dado (J_{k^*}), los sucesos (B) y (C) son independientes, por lo que $P(BC|J_{k^*}) = P(B|J_{k^*})\, P(C|J_{k^*})$. Es decir, dado (J_{k^*}), la probabilidad de que (B) y (C) ocurran es también mayor que cero.

Por último, puesto que tres eventos cualesquiera X, Y y Z con $P(Z) > 0$ satisfacen siempre que $P(XYZ) = P(XY|Z)P(Z)$, podemos concluir que la probabilidad de que (J_{k^*}), (B) y (C) ocurran es siempre mayor que cero.

Ahora bien, si (J_{k^*}), (B) y (C) ocurren, entonces $f_{M+1}(e_{M+1}(k^*)) = k^*$. Y, para todo $i \neq k^*$, tendremos que $f_{M+1}(e_{M+1}(i)) = f_M(e_M(i))$ (esto último se debe a la regla que nos dicta cómo actualizar la función f_M y al hecho de que $e_M[\overline{N}] = \overline{N}$, lo que implica que, si $i \neq k^*$, $e_M(i) \neq e_M(k^*)$). Por tanto, $\delta_{M+1} < \delta_M$.

Empleando el mismo razonamiento que en la primera parte de la demostración, podemos concluir que, si $\delta_M > 0$, antes o después llegará una ronda $R > M$ en la que $\delta_R = 0$. Es decir, con probabilidad uno, Eva y Fabio alcanzarán tarde o temprano la coordinación absoluta.

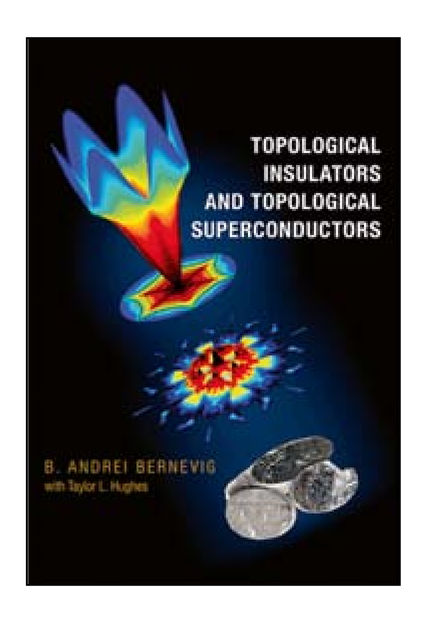
La demostración anterior nos da una idea de qué clase de mecanismos pueden conducir a la emergencia de un sistema de comunicación rudimentario. Pero, si deseamos trasladar este resultado al problema de la evolución de las lenguas naturales, habremos de reconocer que estas últimas resultan mucho más complejas que los sistemas de comunicación como los que hemos considerado aquí.

Por otro lado, hemos supuesto que Eva y Fabio saben desde el principio en qué consiste el juego. Sin embargo, no podemos garantizar que ese sea el caso si les resulta imposible comunicarse. Tal vez Fabio decida abrir siempre la puerta roja sin importar lo que diga Eva. O puede que Eva pronuncie *kùla* con independencia de dónde se encuentre la jirafa.

Quizá la aparición de códigos simples resulte, en cierto modo, inevitable. A pesar de ello, aún nos encontramos muy lejos de entender cómo la interacción entre seres humanos pudo dar lugar a un sistema de comunicación tan complejo como las lenguas naturales.

PARA SABER MÁS

La evolución de sistemas de comunicación puede estudiarse con herramientas de la teoría de juegos evolutiva. Una discusión magistral sobre cómo interpretar muchos de los resultados obtenidos en este contexto es la de Brian Skyrms, **Signals: Evolution, learning, and information** (Oxford University Press, 2010). El resultado más general que hemos analizado en esta columna se encuentra en **The role of forgetting in the evolution and learning of language**, publicado por Jeffrey Barrett y Kevin Zollman en el *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 21, n.º 4, 2009. Una herramienta interactiva para simular la evolución de estrategias en juegos de coordinación como el de la jirafa se encuentra disponible en **ess.nbb.cornell.edu**.



TOPOLOGICAL INSULATORS AND TOPOLOGICAL SUPERCONDUCTORS

Por B. Andrei Bernevig y Taylor L. Hughes. Princeton University Press, Princeton, 2013.

Materiales topológicos

Una introducción formal a uno de los campos más candentes en la física del siglo XXI

A pesar de ser ya una disciplina centenaria, la física cuántica sigue rodeada de cierto halo de misterio. En efecto, cuando se habla de física cuántica se piensa de inmediato en todo tipo de cuestiones metafísicas y poco en aspectos prácticos. No es de extrañar, ya que la mayor parte de los fenómenos cuánticos van en contra de nuestra intuición y no se manifiestan de manera evidente. ¿Significa esto que la física cuántica no tiene impacto en nuestra vida cotidiana? Rotundamente no. Hay multitud de ejemplos que podría usar para ilustrar esta idea, pero me centraré aquí en los grandes avances en el mundo de la electrónica y de las telecomunicaciones que ya se han hecho imprescindibles en nuestro día a día. Estos avances habrían sido imposibles sin el profundo conocimiento que hemos adquirido en las últimas décadas sobre las propiedades electrónicas de distintos materiales de interés tecnológico; conocimiento en gran parte ligado a una de las primeras aplicaciones exitosas de la física cuántica: la teoría de bandas.

En 1928, apenas un año después de que Heisenberg publicase su famoso principio de incertidumbre, Felix Bloch, su primer discípulo, defendía la tesis doctoral «Quantum mechanics of electrons in crystals and developing the theory of metallic conduction». En esta tesis, Bloch concluyó que un electrón en un sólido puede ser descrito como una onda cuántica que está modulada por el potencial periódico de la red cristalina y que, por tanto, puede ser difractado por esta. Esta difracción genera bandas electrónicas que pueden contener regiones energéticamente prohibidas, denominadas *gap* en inglés, en las que el electrón no se puede propagar. Estas brechas energéticas determinan si un material con cierta densidad electrónica es un aislante, un semiconductor, o un metal.

A pesar de ser una descripción extremadamente simplificada en muchos casos, la teoría de bandas es capaz de describir correctamente un gran número de materiales. Entre sus éxitos se cuentan no pocos materiales y dispositivos fundamentales en nuestra sociedad y en nuestra economía. Pensemos por un momento en cuán distinto sería el mundo sin los ordenadores o las telecomunicaciones inalámbricas: detrás de ellos están las tecnologías derivadas de la física de semiconductores y de los transistores.

Debido en gran parte a esos éxitos, pensábamos hasta hace poco que entendíamos bien todos los aspectos de la teoría de bandas electrónicas. Nada más lejos de la realidad: en los últimos años hemos aprendido a estudiarlas desde un punto de vista radicalmente nuevo; el de sus propiedades topológicas.

Ese original punto de vista rompe con varios paradigmas que creíamos bien establecidos y nos ha permitido descubrir nuevos materiales con propiedades que ni tan siquiera intuíamos; entre ellas, la de ser aislante en todo el volumen pero metálico en la superficie. Como veremos a continuación, estas superficies de carácter metálico son muy robustas debido a una protección topológica que permite a la corriente eléctrica fluir sin pérdidas. Esta protección aparece como resultado de un nuevo tipo de transición de fase, muy distinta de las que hallamos en termodinámica y física estadística. Vayamos por partes.

La topología es la rama de las matemáticas que estudia qué propiedades de los cuerpos geométricos permanecen invariantes cuando los deformamos de manera suave. Imaginemos que aplastamos lentamente una esfera de plastilina hasta obtener un disco. Desde el punto de vista de la topología, ambos objetos son equivalentes, pues hemos realizado esa deformación sin cortar y sin pegar. Al contrario, no podemos transformar una esfera en una rosquilla, ya que no podemos crear un agujero sin romperla. Matemáticamente, la geometría y la topología se relacionan mediante un invariante topológico que mide el número de agujeros; este se calcula de manera rigurosa mediante una integral de superficie de la curvatura geométrica.

Los conceptos anteriores no se restringen al ámbito de la geometría. De manera similar, podemos calcular integrales sobre la superficie de cierta estructura de bandas y obtener un invariante topológico denominado número de Chern. Igual que no podemos convertir una rosquilla en una esfera sin cerrar un agujero, no podemos convertir una banda normal (con número de Chern cero) en una topológica (con número de Chern no nulo) sin cerrar una brecha (*gap*). Este proceso donde el número de Chern, o cualquier otro invariante topológico, cambia al cerrar una brecha se denomina transición topológica. La consecuencia más inmediata es que un aislante topológico siempre tiene una frontera metálica (sin brecha) cuando está en contacto con un aislante normal o con el vacío.

Esas ideas empezaron a tener relevancia en física de la materia condensada con el descubrimiento del efecto Hall cuántico. En 1980, Klaus von Klitzing (premio nóbel de física en 1985) descubrió que un sistema bidimensional de electrones sometido a un alto campo magnético exhibía una resistencia Hall (el cociente entre el voltaje en una dirección y la corriente eléctrica en la dirección transversa) que estaba cuantizada en múltiplos enteros del cociente h/e^2, que solo depende de constantes fundamentales, la constante de Planck h y la carga del electrón e [*véase* «El efecto Hall cuántico», por Klaus von Klitzing; Investigación y Ciencia, mayo de 1986]. Sorprendentemente, este cociente presentaba una robustez

inusual (la cuantización de la resistencia Hall tiene una precisión de más de una parte en mil millones y se usa hoy en día para determinar la carga del electrón y la unidad de resistencia) en casi cualquier tipo de muestra, independientemente del grado de desorden o de otros detalles microscópicos.

Apenas dos años después de los experimentos de Von Klitzing, un trabajo teórico demostró que la cuantización de la resistencia Hall guarda relación con el número de Chern y que, por tanto, es resultado de una fase topológica. Físicamente, el número de Chern determina el número de canales unidireccionales (quirales) que se propagan por el borde de la muestra. Debido a su quiralidad, estos canales topológicos son robustos frente al desorden y conducen la corriente eléctrica sin pérdidas. El número de Chern está a su vez asociado con ciertas fases geométricas (las fases de Berry) que adquiere la función de onda de Bloch.

A pesar de que durante mucho tiempo se pensó que estos efectos topológicos estaban restringidos a sistemas de tipo Hall, en los últimos años hemos aprendido que pueden existir materiales topológicos en tres dimensiones y en ausencia de campos magnéticos elevados. Estos avances han abierto considerablemente el abanico de posibles materiales topológicos y han hecho de este campo uno de los más punteros en la física del siglo XXI.

El libro que nos ocupa explica en dieciocho capítulos estos conceptos y avances de manera rigurosa. Los quince primeros están escritos por Andrei Bernevig, profesor de la Universidad de Princeton, y cubren en detalle todas las ideas fundamentales y la matemática subyacente a la física de los aislantes topológicos. El resto de los capítulos se deben a Taylor Hughes, profesor de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, y se centran en los materiales topológicos que presentan una brecha de tipo superconductor.

El libro comienza con un bloque de capítulos que establecen las bases matemáticas para entender estos sistemas. Después de una breve introducción, nos adentra en las fases de Berry, la relación entre la resistencia Hall y los números de Chern, la simetría bajo inversión temporal, la correspondencia entre volumen y frontera (que establece bajo qué condiciones rigurosas un sistema posee bordes metálicos de carácter topológico) y la descripción a bajas energías de la red hexagonal del grafeno en términos de la ecuación de Dirac para electrones relativistas. Equipado con este bagaje matemático, el lector está preparado para entender en profundidad los primeros modelos de aislantes topológicos.

Históricamente, el primer modelo de aislante topológico fue propuesto por F. Duncan M. Haldane en 1988. Con él demostró que es posible obtener el efecto Hall cuántico en una red con simetría hexagonal (adelantándose en más de quince años al advenimiento del grafeno), rompiendo la simetría bajo inversión temporal pero sin crear un flujo magnético neto.

En el año 2005, Charles L. Kane y Eugene J. Mele publicaron uno de los avances decisivos en el campo: la demostración de que el efecto espín-órbita (el acoplamiento relativista del momento angular del electrón con su espín) permite la existencia de fases topológicas sin necesidad de romper la simetría bajo inversión temporal con un campo magnético. Estas fases se caracterizan por un nuevo invariante topológico, denominado Z_2, que señala la aparición de dos estados de borde con helicidad bien definida (las dos proyecciones del espín electrónico se propagan en direcciones opuestas). Estos dos estados de borde se pueden entender como dos copias del efecto Hall cuántico y dan lugar al efecto Hall cuántico de espín.

Los dos autores del libro propusieron en 2006, junto con Shou Cheng Zang, que dirigía el grupo de investigación en la Universidad Stanford, un material real (una aleación de mercurio y telurio) que podría exhibir este efecto. El grupo de Laurens W. Molenkamp, en la Universidad de Wurzburgo, recogió el guante y solo un año después anunciaba la confirmación de la propuesta teórica: las primeras medidas experimentales que demostraban el efecto Hall cuántico de espín. Debido a esta propiedad, estos materiales son muy prometedores de cara a sus aplicaciones en electrónica basada en el espín (espintrónica).

El otro gran avance del campo, el de los materiales topológicos tridimensionales, se explica con gran detalle en los últimos capítulos del primer bloque del libro. La superficie de estos materiales es similar al grafeno y también se caracteriza por tener estados con helicidad bien definida, descritos por la ecuación de Dirac en dos dimensiones. Este bloque acaba con una breve discusión sobre dos de las más importantes consecuencias experimentales de los invariantes topológicos en tres dimensiones: el efecto Hall cuántico anómalo y el efecto magnetoeléctrico topológico. Esta física se investiga en la actualidad en varios laboratorios punteros de todo el mundo, en materiales como el antimoniuro de bismuto o el seleniuro de bismuto, y puebla las páginas de publicaciones de prestigio como *Nature* y *Science*.

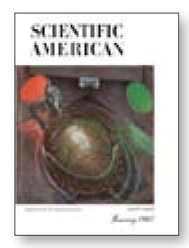
La última parte del libro se centra en los materiales topológicos superconductores. La peculiaridad de estos materiales es que sus estados de borde son aún más exóticos: tienen carácter de partícula de Majorana (una partícula que es igual a su propia antipartícula) y poseen una estadística cuántica denominada *anyon*. Esta se caracteriza por que, tras un intercambio de dos de estos estados de Majorana, la función de onda no se comporta ni como un fermión ni como un bosón. Además, el orden en el que efectuemos el intercambio importa. Estas propiedades podrían resultar útiles en computación cuántica topológica. La detección de partículas de Majorana en superconductores topológicos es en la actualidad otro de los temas más candentes en física de la materia condensada.

Estamos ante una obra que nos ayuda a entender este nuevo campo en física, de la mano de dos de sus protagonistas más destacados. El libro, que nació de un curso de doctorado impartido en la Universidad de Princeton, es por momentos excesivamente técnico, pero proporciona en general una visión muy profunda de la matemática subyacente a los materiales topológicos. Por el contrario, al ser este un campo que evoluciona muy rápidamente, la descripción de propiedades físicas en materiales concretos es quizás algo escueta.

Aparte de sus posibles aplicaciones, los materiales topológicos permiten estudiar todo tipo de fenómenos cuánticos relativistas y conceptos de física de altas energías en sistemas de materia condensada. Estas ideas también han permeado en otros ámbitos como la fotónica, los sistemas de átomos fríos o, como ya he mencionado, la computación cuántica. Nos hallamos sin duda ante uno de los campos más apasionantes y con mayor proyección de la física de los próximos años y que sin lugar a dudas dará lugar a grandes avances conceptuales y técnicos.

—Ramón Aguado
Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid - CSIC

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

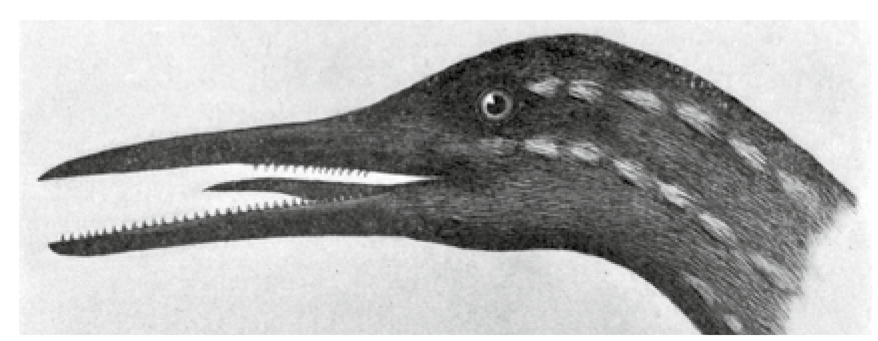


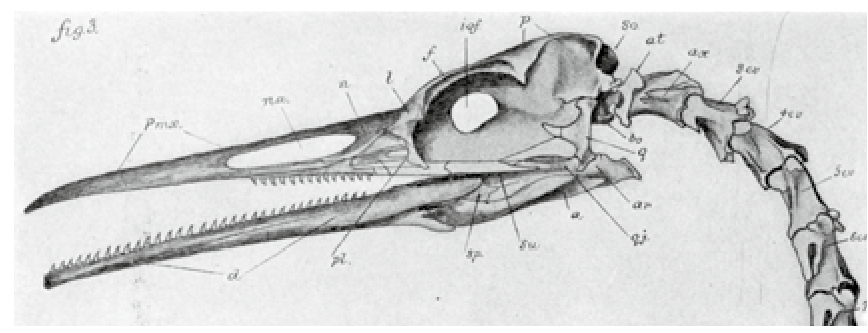
Enero 1965

Transmisión sináptica

«Al no saber cuál es la sustancia transmisora de la gran mayoría de las sinapsis del sistema nervioso, desconocemos si se trata de un gran número de sustancias distintas o solo de unas cuantas. La única identificada con una certeza aceptable es la acetilcolina en el sistema nervioso central de los mamíferos. No sabemos casi nada sobre el mecanismo por el cual un impulso de un nervio presináptico hace que se inyecte la sustancia transmisora en la hendidura sináptica. También ignoramos de qué modo las vesículas sinápticas no inmediatamente contiguas a la hendidura son desplazadas hasta la línea de descarga para sustituir a las vesículas vacías. Se conjetura que estas contienen los sistemas enzimáticos necesarios para autorrecargarse. El proceso debe ser rápido y eficiente: la cantidad total de sustancia transmisora en los botones sinápticos da solo para unos pocos minutos de actividad sináptica a los ritmos de funcionamiento normales. —Sir John Eccles»

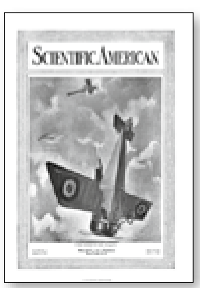
Eccles recibió el premio Nobel de medicina o fisiología en 1963.





HESPERORNIS REGALIS, un ave extinta de gran tamaño con el pico dentado, es representada aquí en una reconstrucción y el dibujo de un fósil, 1915.

SCIENTIFIC AMERICAN SUPPLEMENT, VOL. 79, N.º 2038, 23 DE ENERO DE 1915



Enero 1915

¿Debilidad mental?

«Puede que con un intelecto brillante coexista la tendencia al crimen, tal como ocurre con frecuencia, aunque no podemos detectarla con suficiente precisión; las escalas de medida determinan solo la capacidad intelectual, es decir, la aptitud para pensar, razonar, juzgar, adaptarse a los requisitos sociales del mundo circundante y vivir en armonía con él, conforme a sus leyes y costumbres; pero no incluyen las tendencias perversas, las cuales no pueden detectarse meramente calibrando la inteligencia. El objeto de nuestra escala de salud mental en la isla Ellis consiste en detectar aquellos emigrantes que, por su estructura mental, pudieran convertirse en una carga para el Estado o generar una descendencia que exigiera su atención en prisiones, asilos u otras instituciones.»

Un ave con dientes

«Se ha comprobado, más allá de toda duda, que *Hesperornis* era un enorme somormujo cretácico. En el Museo Nacional de EE.UU. hay un esqueleto reconstruido en todas sus partes que lo muestra en su postura natatoria. Los fósiles fueron recuperados ya en 1870 cerca del río Smoky Hill en el oeste de Kansas.»

El cráneo de Piltdown

«El rasgo más destacado de este cráneo, visto de lado, es lo bajo de la bóveda y el escaso desarrollo del toro supraorbitario. A causa del enorme tamaño de las mandíbulas, el rostro debió de haber presentado una apariencia notablemente simiesca. Los huesos nasales, sin embargo, eran negroides, no simiescos. Los rasgos que sí lo eran se concentran en la mandíbula inferior. Tanto es así que algunos se han empeñado hasta el ridículo en demostrar que esta mandíbula pertenecía a un mono y nada tenía que ver con el cráneo. No hay que decir que tales opiniones las expresaron solo quienes desconocen los enigmas de la anatomía comparada. —Profesor W. P. Pycraft, Museo Británico, Londres»

En 1953 se demostró que los fósiles de Piltdown eran un fraude.



Enero 1865

Fósforos de seguridad

«La cerilla de fricción que ahora se vende es distinta a todo lo existente hasta la fecha. En el costado de la caja hay un trozo de lija químicamente preparada. Cuando se frota contra esta, la cerilla se prende al instante; pero si se rasca contra cualquier otra superficie se niega tercamente a la llama. Al ponerla sobre un hornillo al rojo, su madera se calcinará antes de que se inflame la punta. Frotar esta contra otra cosa que no sea ese cartoncillo preparado no le produce efecto alguno. Se trata de un invento inglés y, por una ley especial del Parlamento, el uso de otras clases de fósforos está prohibido en los edificios públicos. No hay ni vestigios de azufre en la composición de estas cerillas.»



INFORME ESPECIAL: INNOVACIÓN

10 ideas para cambiar el mundo

VV.AA.

Un nuevo método de edición del ADN, materiales bidimensionales revolucionarios y otros avances que impulsarán el progreso en los próximos años.



INMUNOLOGÍA

La ilusión de la inmunidad

Adam J. Kucharski

Complejas herramientas matemáticas indican que el sistema inmunitario queda desorientado cuando ha de reconocer las sutiles mutaciones del virus de la gripe.

CLIMA

Comportamiento anómalo de la corriente en chorro

Jeff Masters

Los veranos e inviernos extremos de los últimos cuatro años podrían convertirse en habituales.

ASTRONOMÍA

Buscando fósiles en la Vía Láctea

Kathryn V. Johnston

Al comienzo de su historia, la Vía Láctea engulló un gran número de galaxias diminutas. Los escombros cósmicos que dejó atrás proporcionan ahora nuevas pistas sobre cómo se originó nuestro rincón del universo.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes*, *Los primeros mamíferos placentarios y Vida a lo grande*; Luis Guillermo Villanueva: *Conexiones para una red cuántica*; Javier Macía: *Biocircuitos sincronizados*; Sara Arganda: *En el cerebro del meditador*; Juan Pedro Adrados: *El sistema solar más allá de Neptuno*; Marco Rios Schmid: *La riqueza idiomática de los Andes*; Marián Beltrán: *¿El fin del crecimiento económico?*; Juan Manuel González Mañas: *Viroterapia contra el cáncer*; Fabio Teixidó: *Pioneros de la fotometría fotoeléctrica*; Raquel Santamarta: *Curiosidades de la física*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España